DIE WIDERSTANDSÄNDERUNGEN SEHR DÜNNER, STROMDURCHFLOSSENER DRÄHTE IM VAKUUM UND IHRE BEZIEHUNG ZUR EMPFINDLICHKEIT EINIGER THERMOINDIKATOREN.

(MITTEILUNGEN DER PHYSIKALISCHEN VERSUCHS-STATION HALLE-CRÖLLWITZ.)
(No. 23.)

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

VEREINIGTEN FRIEDRICHS-UNIVERSITÄT HALLE-WITTENBERG

VORGELEGT VON

FRITZ FALCKE
AUS SEEHAUSEN (ALTMARK).

HALLE A. S.
HOFBUCHDRUCKEREI VON C. A. KAEMMERER & CO.
1910.

Referent: Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. **Dorn.**

Meinen lieben Eltern!

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41544723_0103

Inhaltsübersicht.

Seite

Einleitung 7

I. Versuchsanordnung 8

II. Diskussion der Kurve $w = f(i)$ 9

III. Widerstandsänderungen der Cu-Ni- und Fe-Ni-Legierungen 11

IV. Beziehung zwischen der Thermoelektrizität und der Widerstandsänderung ω der Legierungen 13

a) der experimentelle Zusammenhang

b) der theoretische Zusammenhang

V. Alterungserscheinungen der Legierungen 14

a) Manganin und Cu-Ni-Legierungen

b) Zusammenhang der Alterungserscheinungen der Cu-Ni-Legierungen und Heusler-schen Legierungen

c) Erklärung der Alterungserscheinungen

VI. Abhängigkeit der Größe ω von dem Durchmesser und der Länge des Drahtes 18

a) für Platindrähte

b) Anwendung auf Barretter

VII. Zusammenfassung der Resultate 20

Benutzte Zeichen.

$\sigma = \Delta w$ = Stromfaktor, d. h. die Widerstandsänderung pro 1 Milliamp. in dem geradlinigen Teil der Kurve $w = f(i)$.

$\omega = \frac{\Delta w}{w} = \frac{\sigma}{w}$ = Widerstandsänderung pro 1 Ω und 1 Milliamp., entnommen aus dem geradlinigen Teil der Kurve $w = f(i)$.

C = Fmpfindlichkeitsfaktor des Thermoelementes.

λ = Faktor der Wärmeleitfähigkeit.

$\varkappa$ = Faktor der elektrischen Leitfähigkeit.

Fe-Ni = Eisen-Nickel.

Cu-Ni = Kupfer-Nickel.

Einleitung.

Für die Messung der Intensität schneller elektrischer Schwingungen spielen der Barretter und das Thermoelement eine bedeutende Rolle. Bei beiden Meßinstrumenten wird die elektrische Schwingung über einen dünnen Draht geleitet, der sich im Vakuum befindet, und die in ihm erzeugte Joulesche Wärme als Maß für die Intensität der Schwingung benutzt. Und zwar dient beim Thermoelement die Joulesche Wärme dazu, die eine Lötstelle zu erwärmen. Die so herbeigeführte Temperaturdifferenz der Lötstellen des Thermoelementes erzeugt einen thermoelektrischen Strom, der uns ein Maß für die Intensität der Schwingung ist. Beim Barretter ist ein dünner Wollastondraht in einen Zweig der Wheatestoneschen Brücke geschaltet. Wird dieser Draht mit einer Schwingung beschickt, so ändert er infolge der Jouleschen Wärme seinen Widerstand, und das Gleichgewicht in der Brücke ist gestört. Der Ausschlag des Nullinstrumentes in der Brücke gibt uns ein Maß für die Intensität der elektrischen Schwingung.

Für diese hochempfindlichen Meßinstrumente ist das Verhalten der für sie verwendeten äußerst dünnen Drähte von großer Wichtigkeit. Nur durch Kenntnis der dabei auftretenden Vorgänge erhält man Aufklärung über die Konstanz der Angaben solcher Instrumente und kann die Vorsichtsmaßregeln feststellen, die bezüglich ihrer Behandlung zu beachten sind. Ferner gewinnt man Anhaltspunkte für eine weitere Erhöhung ihrer Empfindlichkeit.

In seiner Dissertation[1]) hat Knopp die thermoelektrische Kraft verschiedener Metalle und Legierungen untersucht und hat Thermoelemente von ausgezeichneter Empfindlichkeit konstruiert. Beim Barretter liegen die Verhältnisse viel komplizierter, und es ist bisher trotz sehr genauer Meßmethoden und eingehender Untersuchungen nicht gelungen, die Einzelfaktoren in ihrer Wirkung auf die Empfindlichkeit des Barretters zu trennen. Auf den Zusammenhang der Empfindlichkeit mit dem Stromfaktor σ (Widerstandsänderung pro 1 Milliamp.) ist zuerst von Prof. K. E. F. Schmidt[2]) hingewiesen worden. Aus seinen Erörterungen folgt weiter, daß die Empfindlichkeit mit zunehmendem Barretterwiderstand, also mit länger werdender Schleife und kleiner werdendem Drahtdurchmesser wächst. Da nun durch den Widerstand auch die Dämpfung im Schwingungskreise erhöht wird, läßt sich die Frage nach der günstigsten Barretterkombination nur experimentell beantworten. Aus den Untersuchungen,[3])[4])[5]) die in dieser Richtung im Laboratorium von Prof. K. E. F. Schmidt angestellt sind, ergibt sich noch kein klares Bild. Eine Abhängigkeit der Barretterempfindlichkeit vom Drahtdurchmesser hat sich bisher noch nicht konstatieren lassen. Für die Beziehung zwischen Empfindlichkeit und Schleifenlänge liegen verschiedene Kurven vor, von denen einige ein Optimum aufweisen und andere nicht (vgl. Kempes Diss. Fig. 10 u. 11), also ist auch hier der Zusammenhang noch nicht vollständig geklärt.

Von besonderer Wichtigkeit für diese Fragen ist die Feststellung der Abhängigkeit der Größe $\omega = \frac{\sigma}{w}$, der Widerstandsänderung pro 1 Ω und 1 Milliampere, von der Länge und Dicke bei Platin-

1) Knopp, Inaug.-Diss. Halle a. S. 1909.
2) K. E. F. Schmidt, Phys. Zeitschr. 8, 1907 pag. 601—606.
3) Rautenkrantz, Phys. Zeitschr. 9, 1908 pag. 911—915. — 10, 1909 pag. 93—97.
4) Neuhaus, Diss. Halle 1909.
5) Kempe, Diss. Halle 1909.

drähten. Auf diese Untersuchungen wurde ich noch besonders hingewiesen durch Dr. Zöllich, der auf Grund thermodynamischer Betrachtungen für den Widerstand eines stromdurchflossenen Drahtes eine Formel aufgestellt hat, welche die Abhängigkeit des Widerstandes von der Stromstärke, der Länge und Dicke des Drahtes unter Berücksichtigung der Wärmeabgabe durch die Elektroden und Strahlung ergibt. Dr. Zöllich wird diese Arbeit in nächster Zeit veröffentlichen.

Zur Klärung dieser Fragen und einiger bei der Untersuchung der Thermoelemente aufgetretenen Probleme fehlen bisher Untersuchungen an äußerst dünnen Drähten, wie sie für die genannten Apparate benutzt werden. Auf Veranlassung von Herrn Prof. K. E. F. Schmidt habe ich daher in seinem Laboratorium eine Reihe von Metallen und Legierungen in Bezug auf ihr Widerstandsverhalten im Vakuum untersucht.

I. Versuchsanordnung.

Die zu untersuchenden Drähte hatten einen Durchmesser von 0,0206 und 0,0208 mm. Ich wählte sie in einer Länge von 70 mm. Sie wurden mit Silberlot an Platinstützen angelötet, die einen Durchmesser von 0,4 mm hatten, und mit diesen Platinstützen in ein Glasrohr eingeschmolzen. Dies Glasrohr wurde mit einer Quecksilberluftpumpe bis auf mindestens 0,02 mm Druck evakuiert.

Zur Bestimmung der Widerstände der Drähte und der Stromstärken wurde die Kompensationsmethode verwendet, die durch das Schaltungsschema Fig 1 (s. am Schluß) veranschaulicht ist. Der Strom einer Batterie E fließt über einen Spannungsteiler Sp, durch den zu untersuchenden Draht X, der sorgfältig in Watte verpackt ist, um jeden äußeren Temperatureinfluß zu vermeiden, und einen Normalwiderstand W der Firma O. Wolff-Berlin (10 Ohm Manganin im Petroleumbad). Ein Sechsnapfumschalter ermöglicht es, einmal den zu untersuchenden Draht, das andere Mal den Normalwiderstand W an einen Feußnerschen Kompensationsapparat mit Kurbelschaltung (O. Wolff-Berlin) anzuschließen. Der Apparat enthält 8 Schleifkontakte und zwar die beiden einfachen Hebel für die Tausender und Hunderter und die drei Doppelhebel für die Zehner, Einer und Zehntel. Hintereinander geschaltet sind:

bei H_1		14	Widerstände	zu	1 000	Ω =	14 000 Ω
bei H_2		9	„	„	100	„ =	900 „
bei H_3 und H'_3	je	9	„	„	10	„ =	90 „
bei H_4 und H'_4	„	9	„	„	1	„ =	9 „
bei H_5 und H'_5	„	10	„	„	0,1	„ =	1 „
							15 000 Ω

Uber diesen Widerstand von 15 000 Ω ist die Batterie E′ geschlossen, wir wollen diesen Strom Kompensationsstrom J nennen. Er ist konstant, da er immer, wie auch die Hebel stehen, denselben Widerstand zu überwinden hat, da ja bei den drei mittleren Hebeln stets im unteren Kreis $H'_3\,H'_4\,H'_5$ ebenso viel Widerstand eingeschaltet wie im oberen Kreis $H_3\,H_4\,H_5$ ausgeschaltet wird.

Außerdem ist es möglich über $H_1\,H_2\,H_3\,H_4\,H_5$ und ein empfindliches Spiegelgalvanometer (Deprez-d'Arsonval, Systemwiderstand 50 Ω, Gesamtwiderstand 200 Ω) einmal ein Weston-Normalelement N (hergestellt von der European Weston Electrical Instrument Co. Berlin) durch den Kontakt n und das andere Mal den Meßkreis a b durch den Kontakt x zu schließen.

Nun wird zunächst die elektromotorische Kraft e_n des Normalelementes N, dann die Potentialdifferenz e_{10}, die zwischen den Klemmen des Normalwiderstandes W herrscht, und schließlich die Potentialdifferenz e_x zwischen den beiden Enden des zu untersuchenden Drahtes x gegen die elektromotorische Kraft der Kompensationsbatterie E′ kompensiert. Diese Kompensation zeigt sich darin, daß das Spiegel-

galvanometer auf Null einspielt. Die e_n, e_{10} und e_x entsprechenden Kompensationswiderstände seien w_n, w_{10} und w_x.

Es ist dann: $$\frac{e_n}{w_n} = J \text{ und } \frac{e_{10}}{w_{10}} = J$$

also: $$\frac{e_n}{e_{10}} = \frac{w_n}{w_{10}} \text{ analog } \frac{e_n}{e_x} = \frac{w_n}{w_x}$$

$$e_{10} = \frac{e_n \cdot w_{10}}{w_n}$$

$$e_x = \frac{e_n \cdot w_x}{w_n}$$

$e_n = 1{,}0195$ Volt. w_n, w_{10}, w_x werden am Kompensationsapparat abgelesen.

Bezeichnet man nun den Strom, der durch den Normalwiderstand W und den Draht x fließt, mit i, den Widerstand des Drahtes x mit w und den des Normalwiderstandes W mit $w_{10} = 10$ Ω, dann besteht folgende Beziehung.

$$i \cdot w_{10} = e_{10} \text{ und } i \cdot w = e_x$$

Aus der ersten Gleichung findet man:

$$i = \frac{e_{10}}{w_{10}} = \frac{e_n \cdot w_{10}}{w_n \cdot w_{10}} = \frac{e_n}{w_n} \cdot \frac{w_{10}}{10}.$$

Aus der zweiten Gleichung ergibt sich:

$$w = \frac{e_x}{i} = \frac{e_n \cdot w_x \cdot w_n \cdot 10}{w_n \cdot e_n \cdot w_{10}} = w_x \cdot \frac{10}{w_{10}}.$$

Mit dieser Methode ist es also möglich, zu jeder Stromstärke i den entsprechenden Widerstand w des zu untersuchenden Drahtes zu bestimmen.

II. Diskussion der Kurve $w = f(i)$.

Trägt man die Stromstärken in Milliampère als Abzissen und die zugehörigen Widerstände in Ohm als Ordinaten auf, so erhält man im allgemeinen, bei reinen Metallen durchweg, folgende Kurve: Sie steigt zuerst konvex zur i-Achse an, geht dann über in einen geradlinigen Verlauf und wird schließlich konkav zur i-Achse. In Fig. 2a ist als Beispiel die Widerstandskurve eines Platindrahtes von 68 mm Länge und 0,0206 mm Durchmesser gezeichnet.

Nimmt man an, daß die Widerstandszunahme proportional der Temperatur geschieht, wie es für reine Metalle angenähert experimentell[1]) nachgewiesen ist, so erhält man für die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur eine lineare Beziehung. Für Platindrähte habe ich diese Gerade bestimmt, indem ich die Drähte im elektrischen Ofen bis auf 300° erhitzt habe und die Widerstände als Funktion der Temperatur graphisch aufgetragen habe. Die Temperatur wurde mit einem Quecksilberthermometer gemessen und der Widerstand mit dem Kompensationsapparat bestimmt unter Benutzung eines Stromes von ca. $2{,}5 \times 10^{-3}$ Amp. Die gestrichelte Kurve b in Fig. 2 stellt eine derartige Widerstandsgerade dar und zwar auch für den Platindraht von 68 mm Länge und 0,0206 mm Durchmesser.

Die Temperatur eines stromdurchflossenen Drahtes ist bedingt durch die vom Strom erzeugte Joulesche Wärme, und deren Verhältnis zum Verlust durch Leitung und Strahlung. Während sich die Menge der zugeführten Wärme nach dem Jouleschen Gesetz genau bestimmen läßt, ist es schwer, die Größe der Wärmeabgabe genau zu berechnen. Für diese kommen hauptsächlich drei Faktoren in Betracht:

---

1) Vgl. Callendars Platinthermometer. F. Kohlrausch, Lehrb. d. prakt. Phyrik, 1910, pag. 164.

1. Konvektion,
2. Wärmeleitung,
3. Wärmestrahlung.

Die Konvektion, d. h. die Ableitung der Wärme durch die umgebenden Gasteilchen, ist in unserem Falle ohne erheblichen Fehler zu vernachlässigen, da die Röhren sehr gut evakuiert sind, also Luftteilchen zur Fortführung der Wärme so gut wie nicht vorhanden sind. Aus diesem Grunde ist auch die Wärmeleitung durch das Gas sehr gering.

Anders ist es mit der Wärmeleitung, die bedingt ist durch die Ableitung an den Elektroden. Sie führt eine bedeutende Temperaturerniedrigung[1]) herbei, die von der Wärmeleitung des Drahtes und der Elektroden abhängig ist. Die Wärmeleitung wächst angenähert proportional der Temperaturdifferenz.

Für die Wärmestrahlung kommt die Differenz der vierten Potenzen der Drahttemperatur und Umgebungstemperatur in Betracht. Hieraus folgt, daß die Wärmestrahlung für niedrige Temperaturen verhältnismäßig gering ist, während sie für höhere Temperaturen, da sie mit der Differenz der vierten Potenzen der Temperatur wächst, ganz bedeutende Wärmeabgabe bewirkt.

Trägt man den Widerstand des Drahtes in seiner Abhängigkeit von der Stromstärke i graphisch auf, so würde man ohne Berücksichtigung der Wärmeabgabe durch Leitung und Strahlung eine der Parabel ähnliche Kurve erhalten, da die Widerstandszunahme nahezu proportional der Temperaturdifferenz ist, die herbeigeführt wird durch die vom Strom erzeugte Joulesche Wärme, die proportional i^2 ist. Durch Leitung und Strahlung geht jedoch ein erheblicher Teil der erzeugten Wärme verloren, sodaß die Kurve deformiert wird und einen flacheren Verlauf zur i-Achse nimmt. Bei größeren Stromstärken ist infolge der Wärmestrahlung die Temperaturzunahme und die ihr proportionale Widerstandsänderung geringer, weil sehr viel Joulesche Wärme durch Strahlung verloren geht. Diese geringere Widerstandszunahme zeigt sich in unserer Kurve durch das Konkavwerden zur i-Achse.

Um bei den folgenden Versuchen dieselben äußeren Verhältnisse zu haben, benutzte ich bei sämtlichen Metallen und Legierungen Drähte von gleicher Länge und Dicke und gleiche Elektroden. Die Verschiedenheit der Wärmeabgabe der verschiedenen Drähte ist dann nur noch bedingt durch die ungleiche Wärmeleitfähigkeit und Oberflächenbeschaffenheit des Materials, von der die Strahlung wesentlich beeinflußt wird. Von diesen Faktoren hängt es ab, wann der stationäre Temperaturzustand für den Draht erreicht ist. Er tritt für jede Stromstärke bei der Temperatur ein, für welche die durch den Strom erzeugte Wärmemenge gleich der abgegebenen Wärmemenge ist. Bei den reinen Metallen und Fe-Ni-Legierungen stellte er sich sehr schnell ein, spätestens innerhalb 10 Minuten, und war sehr beständig, so daß der Widerstand keiner weiteren Änderung unterworfen war und auch konstant blieb. Bei den Cu-Ni-Legierungen traten Alterungserscheinungen auf, die ich an späterer Stelle genau untersuchen werde.

Da sich so im allgemeinen die Widerstände für alle Stromstärken sehr genau bestimmen lassen, so kann man auch die Kurve $w = f(i)$ mit großer Exaktheit zeichnen. Aus dieser Kurve entnehme ich die Widerstandsänderung[2]) pro 1 Milliampere an der Stelle, wo sie den geradlinigen Verlauf zeigt. Denn an dieser Stelle haben wir für alle Drähte das Maximum für die Widerstandsänderung Δw, was als eine charakteristische Größe für die Widerstandsänderung des Materials anzusehen ist, da alle Drähte gleiche Länge und Dicke besitzen. Dividire ich $\sigma = \Delta w$ noch durch den zugehörigen Widerstand, den ich der Mitte des geradlinigen Verlaufs entnehme, so habe ich in diesem Werte $\omega = \frac{\Delta w}{w}$ die Widerstandsänderung pro 1 Ohm und 1 Milliampere.

Als Beispiel seien hier die Widerstandsänderungen der von mir untersuchten reinen Metalle angegeben. Vom Eisen und Nickel standen mir Drähte von einem Durchmesser $d = 0{,}015$ mm zur Ver-

1) P. Czermak, Sitzungsbericht d. kaiserl. Akad. Wien, 1894, pag. 1107.

2) Entspricht dem Stromfaktor σ der Barretterdrähte.

fügung, die von den übrigen Metallen wegen der Sprödigkeit des Materials nicht herstellbar waren. Die übrigen Drähte hatten einen Durchmesser d = 0,0206 und d = 0,0208 mm. Der geringe Unterschied in der vierten Dezimale ist bei der Zusammenstellung nicht berücksichtigt, da sein Einfluß auf ω sicher innerhalb der Fehlergrenze liegt. i, in Milliampere gemessen, gibt die Stromstärke an, wo die Kurve $w = f(i)$ den geradlinigen Verlauf zeigt, wo wir also ω entnehmen.

Die Widerstandsänderung ω für die reinen Metalle.
d = 0,0206 (8) mm.

Metall	$i \times 10^3$ = Amp.	w in Ω	$\sigma = \Delta w$	$\omega = \frac{\Delta w}{w}$
Kupfer	46,0	6,85	0,26	0,038
Eisen	20,5	63,0	3,85	0,061
Gold	12,0	15,0	0,13	0,087
Nickel	17,0	36,4	5,70	0,156
Platin	23,0	26,4	1,40	0,053

d = 0,015 mm.

Metall	$i \times 10^3$ = Amp.	w in Ω	$\sigma = \Delta w$	$\omega = \frac{\Delta w}{w}$
Eisen	1,5	121	13,5	0,11
Nickel	9,5	97	32,0	0,33

Das Verhältnis von $\frac{\omega \text{ Nickel}}{\omega \text{ Eisen}}$ wächst mit kleiner werdendem Durchmesser von 2,56 auf 3,0, es ist also nicht konstant, sondern von der Drahtdicke abhängig.

III. Widerstandsänderungen der Fe-Ni- und Cu-Ni-Legierungen.

Von den Fe-Ni-Legierungen untersuchte ich 12 verschiedene prozentuale Zusammensetzungen. Die folgenden Zahlen geben den Nickelgehalt der Legierung an:

25,8 32,0 44,0
26,2 35,0 44,2 Kruppin
Eisen 27,9 35,5 50,0 Nickel
28,0 39,4 70,0

In nachfolgender Tabelle sind die Widerstandsänderungen dieser Legierungen zusammengestellt. Die Legierungen mit 27,9 %, 35,0 % und 35,5 % Nickel und Kruppin zeigen ein ausgeprägtes Minimum des Widerstandsanstieges, während die Legierungen mit 32 % und 44,2 % ein Maximum für ω aufweisen.

Der geradlinige Verlauf tritt bei den verschiedenen Drähten bei ganz verschiedenen Stromstärken auf, je nach der Leitfähigkeit der Legierung für Elektrizität und Wärme, die beide nach dem Wiedemann-Franzschen Gesetz in enger Beziehung stehen. Bei den Drähten mit großem Widerstand, also geringer Leitfähigkeit für Wärme und Elektrizität, wird der höhere Temperaturzustand, wo sich die Wärmestrahlung bemerkbar macht, schneller erreicht, da die durch den Strom erzeugte Wärme proportional w ist, und außerdem die Wärmeabgabe durch Wärmeleitung geringer ist. Diese Erscheinung tritt besonders beim Kruppin und den Legierungen mit 27,9 %, 35,0 % und 35,5 % Nickel hervor. Ein umgekehrtes

Verhalten zeigen die reinen Metalle Eisen und Nickel und die Legierungen mit 26,2%, 32,0% und 70% Nickel. Sie besitzen gute Leitfähigkeit für Elektrizität und Wärme, bei ihnen tritt deshalb der höhere Temperaturzustand, wo unsere Kurve den geradlinigen Verlauf zeigt, erst bei größerer Stromstärke ein. Als Beispiel habe ich in Fig. 3 drei derartig verschiedene Kurven der Fe-Ni-Legierungen gezeichnet. Bei der 27,9 prozentigen Legierung, die einen sehr hohen Widerstand besitzt, wird die Kurve schon bei 3 Milliamp. geradlinig, während sich bei der 26,2% Zusammensetzung, deren Widerstand nur halb so groß ist, der geradlinige Verlauf erst bei 8 Milliamp. zeigt. Interessant ist auch ein Vergleich der beiden Kurven der 27,9 und 28,0 prozentigen Legierung, die sich in der prozentualen Zusammensetzung nur wenig unterscheiden und doch so verschiedene Widerstandsänderungen aufweisen, was in den Kurven sehr deutlich zum Ausdruck kommt:

Die Widerstandsänderungen der Fe-Ni-Legierungen.

Prozentgehalt an Nickel	$i \times 10^3 =$ Amp.	w in Ω	$\sigma = \Delta w$	$\omega = \frac{\Delta w}{w}$
Eisen	20,5	63	3,85	0,061
25,8	4,0	110,0	7,5	0,068
26,2	8,0	55,7	4,6	0,083
27,9	3,0	110,4	4,7	0,043
28,0	3,5	96,7	7,5	0,077
32,0	6,0	65,2	7,0	0,107
35,0	2,5	105,2	4,6	0,044
35,5	2,5	141,0	5,3	0,038
39,4	3,5	96,5	5,6	0,058
44,0	3,0	95,6	8,2	0,086
44,2	5,5	74,2	7,7	0,104
50,0	5,0	82,1	6,9	0,085
70,0	6,0	51,1	4,7	0,092
Nickel	17,0	36,4	5,7	0,156
Kruppin	3,0	115,3	4,3	0,037

Während sich bei den Fe-Ni-Legierungen für jede Stromstärke der zugehörige Widerstand stets sehr genau bestimmen ließ, war dies bei den Cu-Ni-Legierungen nicht der Fall. Hier kam es sehr auf die Vorbehandlung des Materials an. Die jungfräulichen Drähte, d. h. die Drähte, wie man sie aus der Fabrik erhält ohne jegliche thermische Vorbehandlung, und wie sie auch zur Herstellung von Thermoelementen benutzt werden, zeigen die Widerstandsänderungen, wie sie in der folgenden Tabelle zusammengestellt sind.

Die Widerstandsänderungen der Cu-Ni-Legierungen.

Prozentgehalt an Nickel	$i \times 10^3 =$ Amp.	w in Ω	$\sigma = \Delta w$	$\omega = \frac{\Delta w}{w}$
Kupfer	46	6,85	0,26	0,038
7	17	38,27	0,265	0,0069
15	15	31,25	0,16	0,0051
20	11	38,49	0,16	0,0042
25	10	46,46	0,13	0,0028
40 (Constantan)	8	68,70	0,018	0,00025
42	8	60,00	— 0,002	— 0,00003
60	8	67,05	0,12	0,0018
80	8	56,00	4,3	0,077
Nickel	17	36,40	5,7	0,156

Wie man aus der Tabelle sieht, standen mir 8 verschiedene prozentuale Zusammensetzungen zur Verfügung. ω nimmt mit wachsendem Prozentgehalt an Nickel zunächst stetig ab, erreicht ein Minimum zwischen 40 und 60 Prozent und steigt dann wieder sehr schnell an. Für die 42 prozentige Legierung und Konstantan ist die Widerstandsänderung nahezu 0. Eine genaue Bestimmung des Wertes ω ist hier nicht möglich, da sich bei ihnen die Alterungserscheinungen sehr stark bemerkbar machen. Auch bei den Kurven dieser Legierungen zeigt sich, daß der geradlinige Verlauf bei den Drähten mit größerem Widerstande bei geringeren Stromstärken eintritt als bei den Drähten mit kleinem Widerstande.

Schließlich möchte ich noch darauf hinweisen, daß bei den Fe-Ni-Legierungen die Widerstandsänderung ω bedeutend größer, ungefähr 10 Mal so groß ist, als bei den Cu-Ni-Legierungen.

IV. Beziehungen zwischen der Thermoelektrizität und der Widerstandsänderung $\frac{\Delta w}{w}$ der Fe-Ni- und Cu-Ni-Legierungen.

In den Figuren 4 und 5 ist $\omega = \frac{\Delta w}{w}$ in seiner Abhängigkeit vom Prozentgehalt an Nickel graphisch aufgetragen. Die gestrichelte Kurve stellt die thermoelektrische Kraft der Legierungen als Funktion ihrer prozentualen Zusammensetzung dar, sie ist entnommen aus den Figuren 18 und 19 der Knoppschen Arbeit. Der Empfindlichkeitsfaktor C des Thermoelementes, der in der Figur als Ordinate aufgetragen ist, ist definiert als

$$C = \frac{i}{\sqrt{\alpha}},$$

wo α der Ausschlag des Galvanometers ist, das den Thermostrom mißt, und i die Stromstärke bedeutet, die in das Thermoelement hineingeschickt wird. Je größer also die Empfindlichkeit des Thermoelementes ist, um so kleiner ist sein Empfindlichkeitsfaktor.[1])

Vergleicht man beide Kurven, so zeigt sich, daß einem Minimum von ω stets ein Extremwert der thermoelektrischen Kraft entspricht, und zwar ein Maximum oder Minimum je nachdem ob man die betreffende Legierung mit einem Metall zu einem Thermoelement vereinigt, das in der thermoelektrischen Spannungsreihe voransteht oder nachfolgt. Bei den Thermoelementen der Cu-Ni-Legierungen mit Manganin zeigt sich ein Maximum der thermoelektrischen Kraft bei dem Konstantan und der 42 prozentigen Legierung, die beide ein Minimum für ω aufweisen. Von den Fe-Ni-Legierungen hat Knopp Kombinationen mit Platin, Eisen und Manganin untersucht. Bei ihnen ergibt sich ein Minimum für die thermoelektrische Kraft bei 27,9 %, 35,0 % und 35,5 % und für Kruppin, diese vier Legierungen zeigen auch für ω ein Minimum. Gegen Nickel und Blei ergeben sie ein umgekehrtes thermoelektrisches Verhalten, nämlich ein Maximum für die Legierungen, die die geringste Widerstandsänderung mit der Stromstärke aufweisen.

Nun hat Liebenow[2]) eine Formel aufgestellt für die Abhängigkeit der thermoelektrischen Kraft von dem Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit λ zur elektrischen Leitfähigkeit $\varkappa$. Er geht dabei aus von der Kohlrauschschen[3]) „Mitführungstheorie“, nämlich „daß mit einem Wärmestrom in bestimmtem, von der Natur des Leiters abhängigem Maße ein elektrischer Strom verbunden sei und daß durch einen elektrischen Strom die Wärme bewegt werde“. Liebenow leitet dann auf thermodynamischem Wege für

---

1) Eine wenig zweckmäßige Bezeichnung, die aber wegen der Beziehung zur Knoppschen Arbeit beibehalten ist.
2) C. Liebenow. Wied. Ann. 68 S. 316 1899.
3) F. Kohlrausch. Pogg. Ann. 156 S. 601 1875.

den absoluten Betrag der thermoelektrischen Kraft E eine obere Grenze her, die bei 1° Temperaturdifferenz der Enden des Leiters durch den Ausdruck $E = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \frac{\lambda}{\varkappa}}$ gegeben ist. T bedeutet die absolute Temperatur. Die elektromotorische Kraft eines Thermoelementes aus zwei Metallen wird darnach gleich der Differenz, oder wegen der Unbestimmtheit des Wurzelvorzeichens eventuell Summe der Ausdrücke E für die beiden Metalle.

Außerdem haben Jäger und Diesselhorst[1]) für Legierungen folgende Beziehung zwischen dem Leitverhältnis $\frac{\lambda}{\varkappa}$ und dem Temperaturkoeffizienten des Widerstandes gefunden: „Je größer das Leitverhältnis $\frac{\lambda}{\varkappa}$ ist, um so kleiner wird im allgemeinen der Temperaturkoeffizient.“ Setzen wir nun die thermoelektrische Kraft in Beziehung zum Temperaturkoeffizienten, so muß mit kleinerwerdendem Temperaturkoeffizienten die thermoelektrische Kraft wachsen, da sie ja nach der Liebenowschen Formel proportional $\sqrt{\frac{\lambda}{\varkappa}}$ ist. Da die Widerstandsänderung ω proportional dem Temperaturkoeffizienten ist, so wird auch das Leitverhältnis $\frac{\lambda}{\varkappa}$ zu ω in derselben Beziehung stehen wie zum Temperaturkoeffizienten, nämlich mit kleiner werdendem ω wachsen. Zwischen der Thermoelektrizität und der Widerstandsänderung ω muß also folgende Beziehung bestehen: Die thermoelektrische Kraft wächst mit kleiner werdendem ω.

Diese Folgerung hat durch meine Untersuchungen der Legierungen eine experimentelle Bestätigung gefunden. Bei den Thermoelementen der Cu-Ni-Legierungen mit Manganin und der Fe-Ni-Legierungen mit Nickel und Blei weisen, wie ich im vorhergehenden Abschnitt gezeigt habe, diejenigen Legierungen ein Maximum der thermoelektrischen Kraft auf, die für ω ein Minimum besitzen. Kombiniert man die Legierungen mit einem Metall, das in der thermoelektrischen Spannungsreihe an dem entgegengesetzten Ende steht wie die im vorhergehenden Satze genannten Metalle, so müssen die Legierungen das umgekehrte Verhalten zeigen, wie es ja auch bei den Thermoelementen der Fe-Ni-Legierungen mit Platin, Eisen und Manganin der Fall ist.

V. Alterungserscheinungen des Manganin und der Cu-Ni-Legierungen.

Schon lange ist es bekannt, daß Konstantan und Manganin zwei Legierungen sind, die einen äußerst geringen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes besitzen. Es ist jedoch noch nicht gelungen diesen Temperaturkoeffizienten genau zu bestimmen, einige fanden ihn als kleinen positiven, andere als kleinen negativen Wert. Er ist abhängig von der thermischen Vorbehandlung des Materials.

Eine genauere Untersuchung des Manganin stellte zuerst Milthaler[2]) an. Er wickelte Drähte von einer Dicke von 0,5 mm auf Rollen und erhitzte sie einen Monat lang täglich einige Stunden in einem Paraffinbade bis zu 110°. Der Widerstand nahm mit der Zahl der Erwärmungen ab und näherte sich einem bestimmten Grenzwert, der dann konstant blieb. Als Ursache für die Widerstandsänderung gibt er an: Der Draht ist durch das Ziehen und Wickeln in einen Zwangszustand versetzt, der den Widerstand erhöht. Der Zwangszustand wird aufgehoben durch das regelmäßige Erwärmen, wodurch molekulare Umlagerungen herbeigeführt werden.

1) Wissenschaftl. Abhdlg. d. Physik. Techn. Reichsanstalt. Bd. III. 1900 S. 359.
2) Milthaler, Wied. Ann. 46, S. 305, 1892.

Bei meinen Untersuchungen des Manganin bezüglich der Abhängigkeit seines Widerstandes von der Stromstärke ergab sich folgendes: Der Widerstand des Drahtes blieb nahezu konstant bis zu einer Stromstärke von 4 Milliampere, wo schon eine geringe Abnahme zu konstatieren war, die mit zunehmender Stromstärke immer größer wurde. Wurde nun der Strom unterbrochen und der Widerstand des Drahtes mit einer kleinen Stromstärke von 1 Milliampere bestimmt, so zeigte sich, daß der Draht diesen geringen Widerstand behalten hatte, daß also die Widerstandsänderung, die durch den Strom von ca. 10 Milliampere herbeigeführt war, eine bleibende war. Da nun nach der Van't Hoffschen Hypotese die Legierungen anzusehen sind als feste Lösungen, so schien es nicht ausgeschlossen, daß in dem Drahte elektrolytische Vorgänge eine Rolle spielten, oder daß vielleicht Umlagerungen stattfänden, die von der Richtung des Stromes abhängig wären. Ich kommutierte deshalb den Gleichstrom und fand, daß diese Umkehrung keinen Einfluß auf den Widerstandsabfall hatte, wie das aus der Figur 6 ersichtlich ist, in der die Widerstandsänderung in ihrer Abhängigkeit von der Zeit graphisch dargestellt ist für einen Manganindraht von 0,0208 mm Durchmesser bei einer Strombelastung von 9,8 Milliampere. Außerdem untersuchte ich den Manganindraht mit 3000 periodigem Wechselstrom, dessen Intensität ich mit einem von mir dazu angefertigten Thermoelemente aus Platin und Eisen in Luft bestimmte. Da der Widerstand des Drahtes nur mit Gleichstrom gemessen werden konnte, mußte bei der Messung der Wechselstrom ausgeschaltet und der zur Messung dienende Gleichstrom eingeschaltet werden. Infolge dieser Komplikation war es nicht möglich, genaue Widerstandskurven mit Wechselstrom aufzunehmen, es ließ sich jedoch feststellen, indem man den Wechselstrom mehrere Stunden wirken ließ und dann den Widerstand mit Gleichstrom bestimmte, daß auch der Wechselstrom eine weitere Erniedrigung des Widerstandes herbeiführte. Durch diese Beobachtungen ist erwiesen, daß diese Widerstandsänderungen der Manganindrähte nicht von der Richtung des Stromes abhängen.

Bei diesen Wechselstromuntersuchungen hatte ich einmal versäumt, den zur Messung dienenden Gleichstrom auszuschalten, so daß der Manganindraht gleichzeitig mit Wechsel- und Gleichstrom belastet war. Jeder dieser Ströme hatte eine Stromstärke von ca. 11 Milliampere. Jetzt zeigte sich die merkwürdige Tatsache, daß der Widerstand des Drahtes von 101,7 Ω auf 105,3 Ω angewachsen war. Diese Erscheinung wird im folgenden ihre Erklärung finden.

Da der Widerstand des Drahtes mit zunehmender Stromstärke immer kleiner wurde, so erhitzte ich ihn einmal bis zu schwacher Rotglut, indem ich ihn längere Zeit mit einer Stromstärke von 25 Milliampere belastete. Die Wirkung war, daß der Widerstand bedeutend anstieg und nahezu den Wert erreichte, den der Draht in seinem jungfräulichen Zustande besessen hatte. Ich versuchte nun die Abhängigkeit des Widerstandes von der Stromstärke genauer festzustellen, indem ich den Strom um möglichst gleiche Beträge änderte, ihn eine viertel Stunde wirken ließ und dann den zugehörigen Widerstandswert bestimmte. Fig. 7a zeigt diese Abhängigkeit. Der Widerstand bleibt bis zu 4 Milliampere nahezu konstant und zeigt dann eine immer stärker werdende Abnahme, die bei ca. 11 Milliampere ein Maximum erreicht. Zwischen 13 und 14 Milliampere biegt die Kurve um, und der Widerstand des Drahtes steigt nun sehr schnell an. Ein derartiges Verhalten konnte bei allen Manganindrähten konstatiert werden, die ich in einer Dicke von 0,0208 mm, 0,017 mm und 0,015 mm Durchmesser untersuchte. Am markantesten zeigten sich diese Widerstandsänderungen bei den dünnsten Drähten, da sie den größten Widerstand besitzen und deshalb auch für 1 Milliampere die größte Widerstandsänderung aufweisen. Auch das Anwachsen des Widerstandes bei gleichzeitiger Belastung mit Wechsel- und Gleichstrom läßt sich jetzt erklären. In bestimmten Perioden, in denen die Wechselstromrichtung mit der Gleichstromrichtung übereinstimmte, verstärkten sich beide Ströme von 11 Milliampere zu einem Gesamtstrom von 22 Milliampere, der diese Widerstandserhöhung herbeiführte.

Darauf belastete ich den Draht längere Zeit mit einer Stromstärke von 11 Milliampere, bei der sich der stärkste Widerstandsabfall zeigte. Die Widerstandsabnahme in ihrer Abhängigkeit von der Zeit stellt die Kurve b der Fig. 7 dar, sie zeigt, daß sich der Widerstand mit zunehmender Zeit einem bestimmten Grenzwerte nähert. Bestimmt man nun für den so gealterten Draht die Widerstandskurve

$w = f(i)$, Kurve c in Fig. 7, so zeigt sie bis zu 10 Milliampere nahezu denselben Verlauf wie die der reinen Metalle. Bei 11 Milliampere biegt sie um, der Widerstand nimmt mit wachsender Stromstärke sehr schnell zu und erreicht bei 24 Milliampere, wo der Draht rotglühend wird, nahezu den Widerstand des jungfräulichen Drahtes.

Durch mehrtägige Belastung mit einem Strom von 11 Milliampere war es möglich, den Widerstand eines Maganindrahtes mit einem Durchmesser $d = 0{,}015$ mm von 117 Ω auf 101 Ω herunterzubringen. Man hat also beim Manganin zwei wesentliche physikalische Zustände zu unterscheiden:

1. Der jungfräuliche Zustand: Der Draht hat einen großen Widerstand und einen kleinen, von der Stromstärke abhängigen, teils positiven, teils negativen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes.

2. Der gealterte Zustand: Der Draht besitzt einen kleineren Widerstand, aber einen größeren positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstandes.

Ganz dieselben Alterungserscheinungen zeigen die Konstantandrähte, von denen ich auch drei verschiedene Dicken untersucht habe. Fig. 8 stellt die drei charakteristischen Kurven für einen Konstantandraht mit einem Durchmesser $d = 0{,}015$ mm dar.

Nun lag die Vermutung nahe, daß ähnliche Alterungserscheinungen auch bei den übrigen Cu-Ni-Legierungen auftreten würden, die ich deshalb in derselben Weise untersuchte wie die Manganindrähte. Hier zeigte sich das Altern bei sämtlichen Legierungen, die einen kleinen Wert für ω besitzen, nämlich bei allen außer der 80prozentigen Legierung. Als Beispiel habe ich in den Figuren 9 bis 12 die Widerstandskurven von vier jungfräulichen Cu-Ni-Legierungen gezeichnet. Der Knick in der Kurve, der uns ein Maß sein kann für die Stärke der Alterung, ist beim Konstantan am stärksten und wird nach beiden Seiten zu den reinen Metallen hin kleiner. Bei der 42- und 60prozentigen Legierung ist er noch ganz erheblich, während er sich bei den übrigen Legierungen nur durch verlangsamtes Ansteigen bemerkbar macht, wie das z. B. aus der Fig. 9 für die 7prozentige Zusammensetzung ersichtlich ist.

Bei den Fe-Ni-Legierungen konnte ich derartige Alterungserscheinungen nicht konstatieren.

Interessant ist es, daß die Heuslerschen ferromagnetischen Mangan-Aluminium-Kupferlegierungen für die Magnetisierbarkeit[1]) einen ähnlichen Zusammenhang mit der Temperatur zeigen, wie ich ihn bei den Cu-Ni-Legierungen für die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit gefunden habe. Die jungfräulichen Heuslerschen Legierungen sind im allgemeinen nur wenig oder garnicht magnetisierbar, werden sie jedoch künstlich gealtert, indem man sie in siedendem Xylol oder Toluol auf 110° bis 140° erhitzt, so zeigen sie starke Magnetisierbarkeit. Bei diesen Legierungen besteht ebenfalls ein Temperaturoptimum zur Überführung des Materials in den Zustand größter Magnetisierbarkeit. Überschreitet man dieses Temperaturoptimum, so tritt eine Verschlechterung des magnetischen Zustandes ein. Heusler faßt diese Resultate folgendermaßen zusammen: „Die Proben, die aluminiumärmeren mehr als die aluminiumreicheren, befinden sich nach dem Guß in einem Zustand labilen Gleichgewichts. Erwärmen auf ca. 110° bewirkt eine künstliche Alterung und den Übergang in die stabile, dem Maximum der Magnetisierbarkeit entsprechende Modifikation.“ Je nach dem schnellen oder langsamen Abkühlen der erwärmten Legierung zeigt sich geringe oder starke Hysteresis, die Prof. Richarz durch Bildung von weniger oder mehr komplizierten Molekularagregaten erklärt. Demnach unterscheidet man hier drei physikalisch charakteristische Zustände[2]) der Legierungen:

1. Der labile schwach ferromagnetische (jungfräulich),
2. der stark ferromagnetische Zustand mit verschwindend kleiner Hysterese (gealtert),
3. der stark ferromagnetische mit starker Hysterese (gealtert).

„Endlich gewinnen manche der vorstehenden Anschauungen noch größere Bestimmtheit, wenn man mit F. Richarz annimmt, daß der molekulare Magnetismus auf dem Vorhandensein von in kreisförmigen Bahnen sich bewegenden Elektronen beruht. Dann könnte ein und dieselbe Molekel magneti-

1) P. Asteroth, Inaug.-Diss. Marburg 1907.

2) Fr. Heusler und F. Richarz, Zeitschr. f. Anorg. Chemie. Bd. 61. 1909. S. 269.

sierbar oder nicht magnetisierbar sein, je nachdem infolge konstitutiver Änderungen derselben einzelne der elektrischen Elementarquanten, die sie enthält, in solchen Bahnen beweglich sind und sich bewegen oder nicht."

Da nun die Beweglichkeit der Elektronen ein die Güte der elektrischen Leitfähigkeit bestimmender Faktor ist, so darf man folgern, daß diese Alterungserscheinungen, die bei den Cu-Ni-Legierungen eine Erhöhung der Leitfähigkeit und bei den Heuslerschen Legierungen eine größere Magnetisierbarkeit herbeiführen, verwandte physikalische Vorgänge sind. Im Marburger Physikalischen Institut läßt Prof. Richarz noch Untersuchungen ausführen, die sich beziehen auf das Verhalten der drei Modifikationen der Heuslerschen Legierungen zur Elastizität, zum elektrischen Leitvermögen und zur spezifischen Wärme. Es wäre gewiß auch erfolgreich, wenn die beiden Zustände der Cu-Ni- und Cu-Ni-Manganlegierungen in Bezug auf die oben genannten physikalischen Eigenschaften untersucht würden. Versuche in dieser Richtung sind von Prof. K. E. F. Schmidt in Aussicht genommen.

Die Alterungserscheinungen der Cu-Ni-Legierungen lassen sich durch die Richarz-Heuslerschen Annahmen erklären. Die Moleküle dieser Legierungen befinden sich durch das Glühen bei der Herstellung und durch das Ziehen zu Drähten in einer labilen Gleichgewichtslage. Die Erwärmung des Drahtes, die in einer Bewegung der Moleküle besteht, gestattet diesen eine stabilere Lage anzunehmen, in der sie sich freier bewegen können. Durch zunehmende Erwärmung wird die Bewegung heftiger und schließlich so stark, daß die Moleküle sich gegenseitig durch Reibung und Zusammenstoß stören, wodurch wieder ein gewisser Zwangszustand herbeigeführt wird, der durch ganz langsames Abkühlen wieder verschwindet. Die elektrische Leitfähigkeit ist nach der Elektronentheorie bedingt durch die Bewegung kleinster elektrischer Teilchen. Je nach der Lagerung der ponderablen Moleküle finden sie bei ihrer Bewegung stärkeren oder geringeren Widerstand. Am kleinsten ist dieser Widerstand für unsere Legierungen, wenn sich die Moleküle in einer möglichst stabilen Gleichgewichtslage befinden.

Eine tiefere Begründung findet die Erklärung der Alterungserscheinungen, wenn man davon ausgeht, dass die Legierungen feste Lösungen sind. Ich stütze mich bei den folgenden Ausführungen auf zwei Vorträge von Prof. Rudolf Schenck,[1]) die er in seinem Buche „Physikalische Chemie der Metalle" veröffentlicht hat. Die elektrische Leitfähigkeit der Metalle, die nach den neueren Anschauungen bewirkt wird durch die Elektronen, ist abhängig von der Anzahl der Elektronen und dem Reibungswiderstand, den diese bei ihrer Bewegung in dem Medium zu überwinden haben. Die starke Änderung der metallischen Leitfähigkeit mit der Temperatur könnte verursacht werden durch eine Verkleinerung der Elektronenkonzentration oder durch eine Vergrößerung der Reibungswiderstände. Durch die optischen Eigenschaften der Metalle ist festgestellt, dass im Temperaturintervall von 1000° die Elektronenkonzentration als angenähert konstant anzusehen ist. „Die starken Änderungen der metallischen Leitfähigkeit mit der Temperatur sind daher auf Änderungen der Reibungswiderstände zurückzuführen. Die Vergrößerung des Widerstandes mit steigender Temperatur wird verständlich, wenn man daran denkt, daß auch die innere Reibung eines Gases mit steigender Temperatur eine Vergrößerung erfährt. Ist nun die kinetische Gastheorie, wie Drude angenommen hat, auf die Elektronen innerhalb der Metalle anwendbar, so muß auch deren innere Reibung infolge der vermehrten Kollisionen, die sie bei der gesteigerten Geschwindigkeit untereinander und mit den in heftigere Schwingungen versetzten ponderablen Teilchen erleiden, zunehmen."

Bei den Legierungen unterscheidet man zwei Arten: 1. solche, bei denen sich beim Erstarren die Komponenten in reinem Zustande als Kristalle ausscheiden, 2. Legierungen, die beim Erstarren feste Mischkristalle bilden.

„Die Mischkristalle sind als richtige Lösungen zu betrachten, trotz ihres festen Agregatzustandes. Man kann an ihnen die charakteristischen Lösungsphänomene, insbesondere die Diffusion des gelösten Stoffes von Stellen höherer Konzentration zu solchen niederer deutlich wahrnehmen." Die Cu-Ni-Legierungen gehören zu dieser zweiten Gruppe.

1) R. Schenck, „Physikalische Chemie der Metalle", Halle a. S., 1909.

Der Schmelzpunkt der Legierungen ist abhängig von ihrer prozentualen Zusammensetzung. Bei ihnen scheiden sich aus der sich abkühlenden Schmelze vielfach zuerst Mischkristalle aus, die einen höheren Schmelzpunkt und eine andere Zusammensetzung haben, als ihnen nach dem Prozentgehalt der ganzen Mischung zukommt. Die völlig erstarrte Legierung ist dann nicht homogen, sondern besteht aus einer Nebeneinanderlagerung von Kristallen verschiedener Zusammensetzung. Dies zeigt sich auch darin, dass die Temperatur des Schmelzpunktes meistens eine andere ist als die des Erstarrungspunktes. Diese Erscheinungen sind bei verschiedenen Legierungen experimentell festgestellt, leider noch nicht bei den Cu-Ni-Legierungen. „In einigen Fällen gelingt es, durch nachträgliches längeres Erhitzen auf möglichst hohe, aber unter dem Schmelzpunkte gelegene Temperaturen eine homogene Beschaffenheit herbeizuführen. Es erfolgt dann ein Ausgleich der ursprünglich verschiedenen Konzentrationsverhältnisse der einzelnen Teilchen durch Diffusion.“ Es liegt nun nahe, bei den Cu-Ni-Legierungen ein derartiges Verhalten zu vermuten und die Alterungserscheinungen darauf zurückzuführen, daß durch die Erwärmung die Inhomogenität der Zusammensetzung beseitigt wird.

Diese Erklärung findet noch eine Stütze, wenn man die elektrische Leitfähigkeit der Legierungen näher betrachtet. Diejenigen Legierungen, die Mischkristalle bilden, haben immer einen bedeutend größeren Widerstand als die Metalle, aus denen sie zusammengesetzt sind. Das läßt sich erklären durch den erhöhten Reibungswiderstand, den die bewegten Elektronen an den diffundierenden Teilchen finden. Es ist evident, dass die Diffusion bei der jungfräulichen inhomogenen Cu-Ni-Legierung stärker ist als bei der gealterten homogeneren Legierung, und daß infolgedessen die Elektronen bei der ersten Modifikation einen größeren Reibungswiderstand zu überwinden haben.

Bei der Benutzung der Thermoelemente der Cu-Ni-Legierungen ist wegen dieser Alterungserscheinungen folgendes zu beachten. Man darf bei diesen Thermoelementen, besonders bei dem empfindlichsten aus Manganin und Konstantan mit der Strombelastung nicht so weit gehen, daß der Teil der Widerstandskurve erreicht wird, wo ω negativ wird. Einmal wird der Empfindlichkeitsfaktor nicht konstant bleiben, dann wird bei zu hoher Strombelastung der Draht Gefahr laufen, in den gealterten Zustand überzugehen, und das Element unempfindlicher werden und bleiben.

VI. Die Abhängigkeit der Widerstandsänderung ω von dem Durchmesser und der Länge des Drahtes.

Um diese Abhängigkeit festzustellen, untersuchte ich Platindrähte von verschiedener Dicke und Länge. Die Resultate sind in den folgenden Tabellen und den Figuren 13 und 14 zusammengestellt.

Die Abhängigkeit der Größe ω vom Durchmesser.

Durchmesser mm	w in Ω	$\sigma = \Delta w$	$\omega = \frac{\Delta w}{w}$
0,0206	26,40	1,40	0,053
0,0308	13,02	0,385	0,028
0,0410	7,36	0,131	0,018
0,0494	6,3	0,090	0,0143

In Fig. 15 habe ich die vier Widerstandskurven für Platindrähte von verschiedenem Durchmesser gezeichnet. Aus den Figuren 13 und 15 sowohl wie aus der Tabelle ist ersichtlich, daß ω mit zunehmendem Durchmesser zuerst schnell, dann allmählich langsamer abnimmt. Dies Resultat war vor-

auszusehen, denn da der Querschnitt des Drahtes schneller abnimmt, also der Widerstand schneller zunimmt, als die Oberfläche abnimmt, so ist auch die Wärmeabgabe durch Strahlung bei dünnen Drähten im Verhältnis zum Widerstand geringer als bei dicken Drähten. Außerdem nimmt die Ableitung der Wärme mit kleinerwerdendem Durchmesser ab. Die relative Wärmeabgabe ist geringer, die Temperaturerhöhung, also auch die Widerstandsänderung pro 1 Milliamp. ist infolgedessen größer.

In seiner Abhängigkeit von der Länge zeigt ω zuerst ein schnelles Wachsen und nähert sich dann einem Grenzwerte.

Die Abhängigkeit der Größe ω von der Drahtlänge.

Länge des Drahtes in mm	w in Ω	$\sigma = \Delta w$	$\omega = \frac{\Delta w}{w}$
40	14,9	0,632	0,0424
48	16,9	0,80	0,0473
54,5	18,0	0,88	0,0490
61,0	20,0	1,03	0,0515
65,0	22,1	1,15	0,0524
68,0	26,4	1,40	0,0530
79,9	28,0	1,55	0,0553
90,0	28,6	1,65	0,0570

Dies ist nach den experimentellen Untersuchungen und theoretischen Erörterungen von P. Czermak[1]) über die Temperaturverteilung längs eines stromdurchflossenen Drahtes leicht erklärlich. Wählt man den Draht lang genug, so läßt sich in der Mitte des Drahtes stets ein Intervall finden, wo die Temperatur konstant ist, wo also keine merkliche Wärmemenge mehr zu den Elektroden hin abgeleitet wird. Je länger man die Drähte wählt, je größer ist dies Intervall. Nimmt man sie nun so lang, daß man überhaupt diesen Temperaturabfall an den Elektroden gegen die konstante Temperatur im übrigen weit größeren Teil des Drahtes vernachlässigen kann, so wird hier eine geringe Längenänderung des Drahtes auf ω keinen Einfluß mehr ausüben. Dies Konstantwerden von ω wird natürlich für dünne Drähte bei geringerer Länge eintreten als für dicke Drähte.

Für die Abhängigkeit des Stromfaktors σ von dem Widerstand des Barretters hat Rautenkrantz[2]) in Fig. 3 seiner Arbeit ganz ähnliche Kurven gefunden, wie ich sie für ω als Funktion von der Länge in Fig. 14 gezeichnet habe. Da der Widerstand eines Drahtes proportional der Länge ist, so ist diese Analogie zwischen den Kurven sehr erklärlich. In den Arbeiten von Rautenkrantz[2]) und Kempe[3]) liegen verschiedene Untersuchungen vor über die Abhängigkeit der Barretterempfindlichkeit vom Stromfaktor. Aus der Unregelmäßigkeit und Ungenauigkeit dieser Kurven ist zu ersehen, daß man es hier nicht mit reinen Verhältnissen zu tun hat. Diese Abweichungen sind zu erklären durch die komplizierte Herstellung des Barretters.

Nimmt man an, daß die Barretterempfindlichkeit mit zunehmendem Stromfaktor wächst (vergl. Kempes Diss. Fig. 11), so kann man für die Abhängigkeit derselben von der Drahtdicke und Schleifenlänge folgende Schlüsse ziehen:

Mit zunehmender Schleifenlänge wächst die Empfindlichkeit des Barretters. Da von einer bestimmten Drahtlänge an eine weitere Verlängerung des Drahtes auf ω nur geringen Einfluß hat, so wird ein Hinausgehen über diese Länge keine wesentliche Verbesserung ergeben.

---

1) P. Czermak, Sitzungsberichte d. kaiserl. Akad. d. Wissensch. Wien 1894 S. 1107.
2) Rautenkrantz, Phys. Zeitschr. 10. 1909. pag. 93—97.
3) Kempe, Diss. Halle 1909.

Dagegen ist die Verminderung des Durchmessers von ganz erheblichem Einfluß (Fig. 13). Da auf mechanischem Wege in dieser Richtung nicht viel Fortschritte mehr zu machen sind, soll versucht werden, auf anderem Wege noch dünnere Drähte herzustellen. Die Versuche sind schon im hiesigen Laboratorium begonnen.

VII. Kurze Zusammenfassung der Resultate.

Die Kurve, die die Abhängigkeit des Widerstandes von der Stromstärke darstellt, ist genau diskutiert. Aus ihr wird die Widerstandsänderung ω pro 1 Ohm und 1 Milliampere entnommen.

Die thermoelektrische Kraft der Legierungen wächst mit kleiner werdendem ω. Dieser Zusammenhang ist experimentell und theoretisch begründet.

Die Alterungserscheinungen des Manganin und der Cu-Ni-Legierungen sind quantitativ genau untersucht und kurvenmäßig dargestellt worden. Man hat bei ihnen zwei wesentliche physikalische Zustände zu unterscheiden: 1. der jungfräuliche Zustand mit großem Widerstand und kleiner Widerstandsänderung, 2. der gealterte Zustand mit kleinerem Widerstand und größerer Widerstandsänderung. Diese Erscheinungen sind in Verbindung gebracht mit gewissen Folgerungen der Elektronentheorie und der Annahme, daß Legierungen als feste Lösungen anzusehen sind.

Diese Ursachen der Alterungserscheinungen bei den Cu-Ni- und den Heuslerschen ferromagnetischen Legierungen sind auf gleiche molekulare thermische Vorgänge zurückgeführt.

Aus der Beziehung zwischen der Widerstandsänderung ω und der Länge und Dicke des Drahtes kann man für die Abhängigkeit der Barretterempfindlichkeit von dem Drahtdurchmesser und der Schleifenlänge folgende Schlüsse ziehen:

Mit zunehmender Schleifenlänge wächst die Barretterempfindlichkeit. Es gibt jedoch für jede Drahtserie eine Schleifenlänge, über die man nicht hinauszugehen braucht, da eine weitere Verlängerung die Barretterempfindlichkeit nicht wesentlich erhöhen würde; dagegen läßt eine Verminderung des Drahtdurchmessers eine außerordentliche Steigerung der Empfindlichkeit erwarten.

Am Schlusse dieser Arbeit erlaube ich mir, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. Schmidt, meinen verbindlichsten Dank für die freundliche Anregung zu diesen Untersuchungen und die stete liebenswürdige Unterstützung bei ihrer Ausführung auszusprechen.

Lebenslauf.

Geboren wurde ich, Friedrich (Fritz) Wilhelm Falcke, am 28. April 1886 zu Seehausen (Altmark) als Sohn des Gutsbesitzers Carl Falcke und dessen Ehefrau Luise geb. Güssow. Meine erste Schulbildung genoß ich in der Dorfschule zu Neukirchen (Altmark), wo mein Vater ein Gut besitzt. Nachdem ich dann zwei Jahre in Seehausen (Altmark) die Bürgerschule besucht hatte, wurde ich Ostern 1896 in die Sexta der dortigen Realschule aufgenommen, wo ich Ostern 1902 die Abschlußprüfung bestand. Ich trat dann in die Obersekunda der Oberrealschule zu Halberstadt ein, die ich Ostern 1905 mit dem Zeugnis der Reife verließ. Seit dieser Zeit habe ich mich an den Universitäten Halle und Wien dem Studium der Mathematik und Naturwissenschaften gewidmet. Am 13. Juni 1910 bestand ich in Halle das Rigorosum. Im Laufe meines Studiums habe ich an den Vorlesungen, Seminarien und Übungen folgender Herren Professoren und Dozenten teilgenommen:

in Wien:

v. Escherich, Hanni, v. Schroeder;

in Halle:

Abert, Bernstein, Buchholtz, Dorn, Ebbinghaus †, Eberhardt, Fries, Gutzmer, Luedecke, Martiny, Menzer, Riehl, Saran, Schultze, Schmidt, Scupin, Taschenberg, Vaihinger, Volhardt †, Vorländer, Wangerin, Wüst.

Sie alle mögen meines dauernden Dankes versichert sein.

Schaltungsschema.

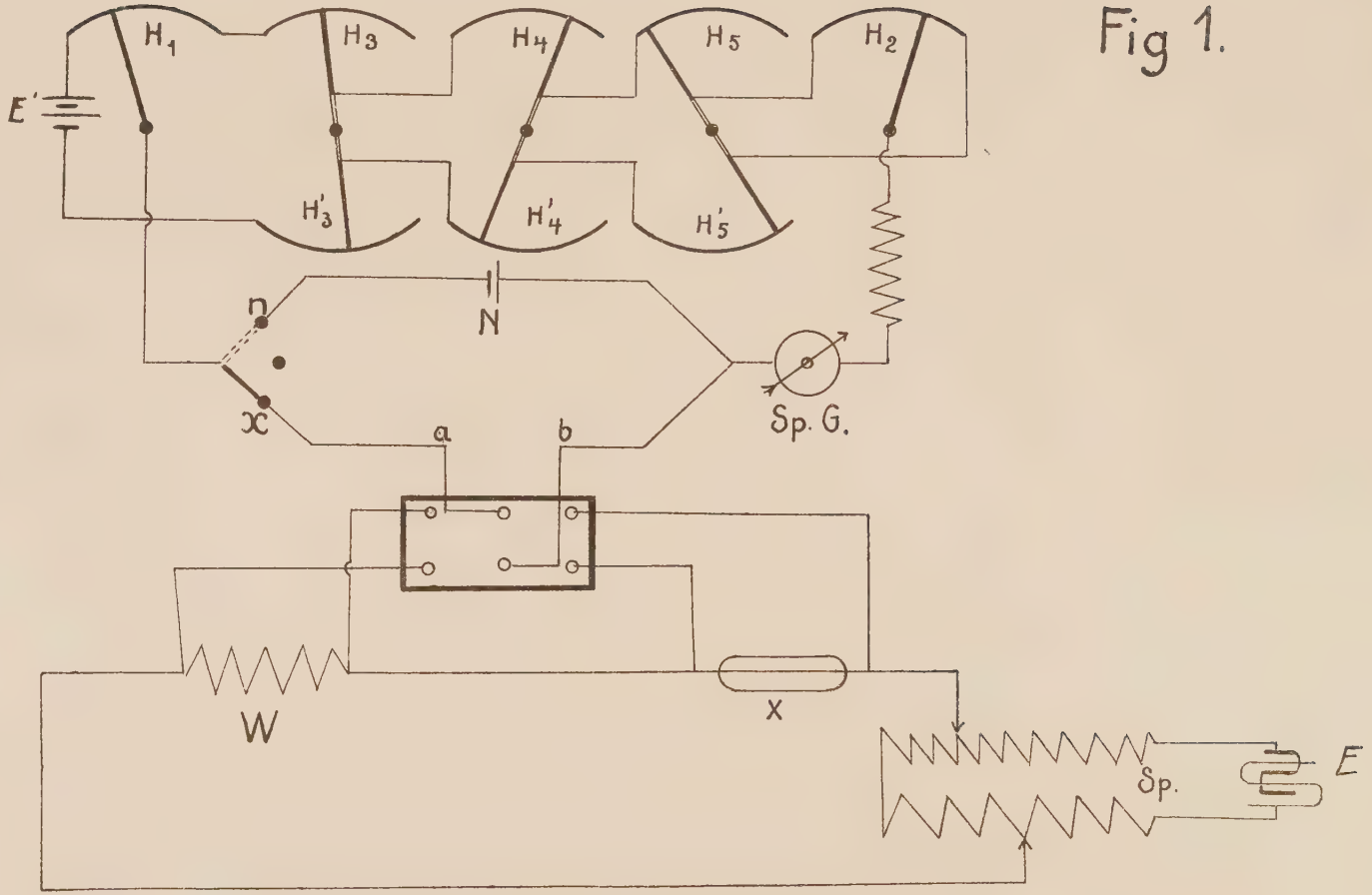


Fig 1.

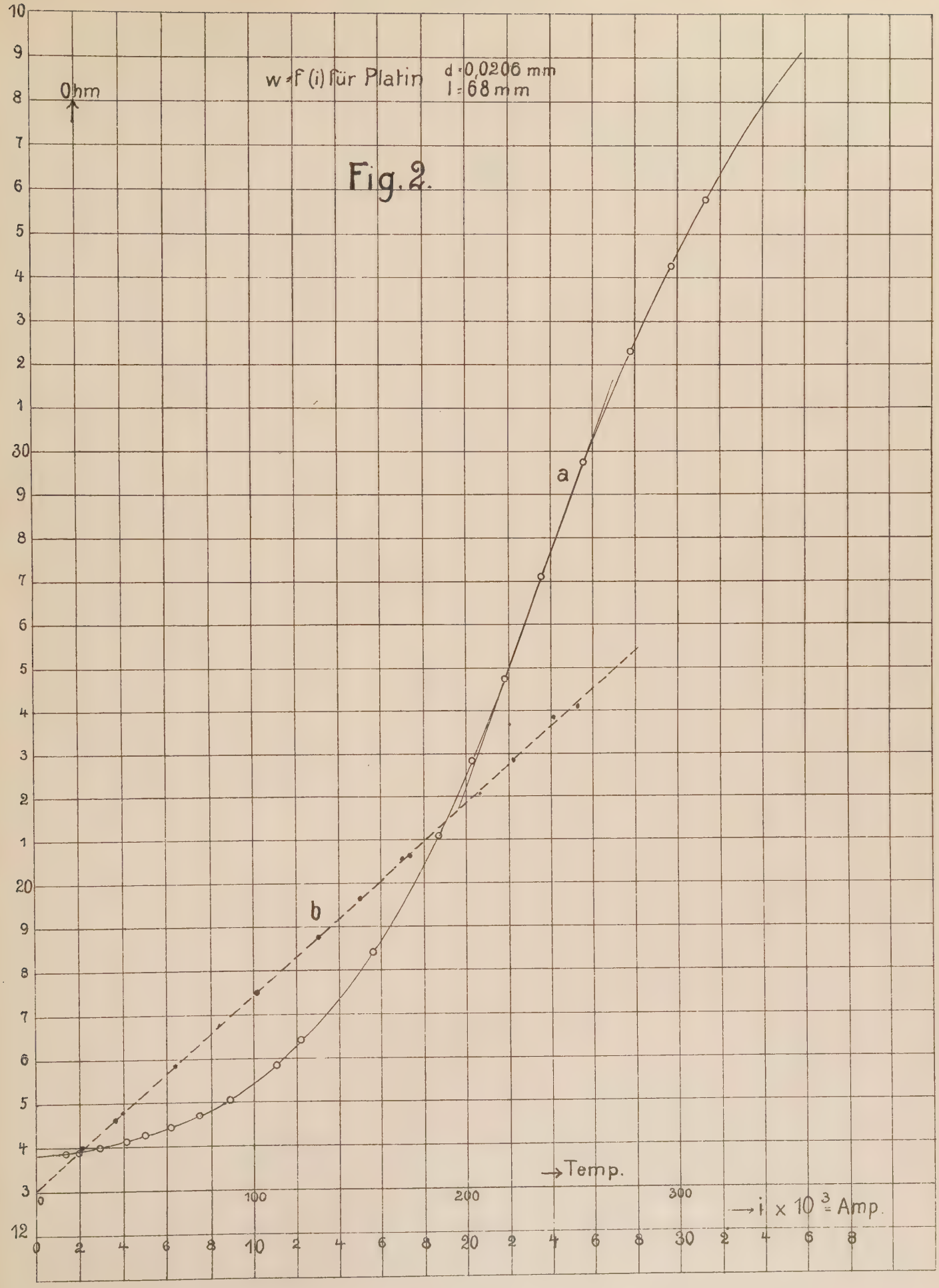

w = f (i) für Platin
d = 0,0206 mm
l = 68 mm
Ohm
a
b
→ Temp.
→ i x 10 3 = Amp.
0
100
200
300

Fig. 2.

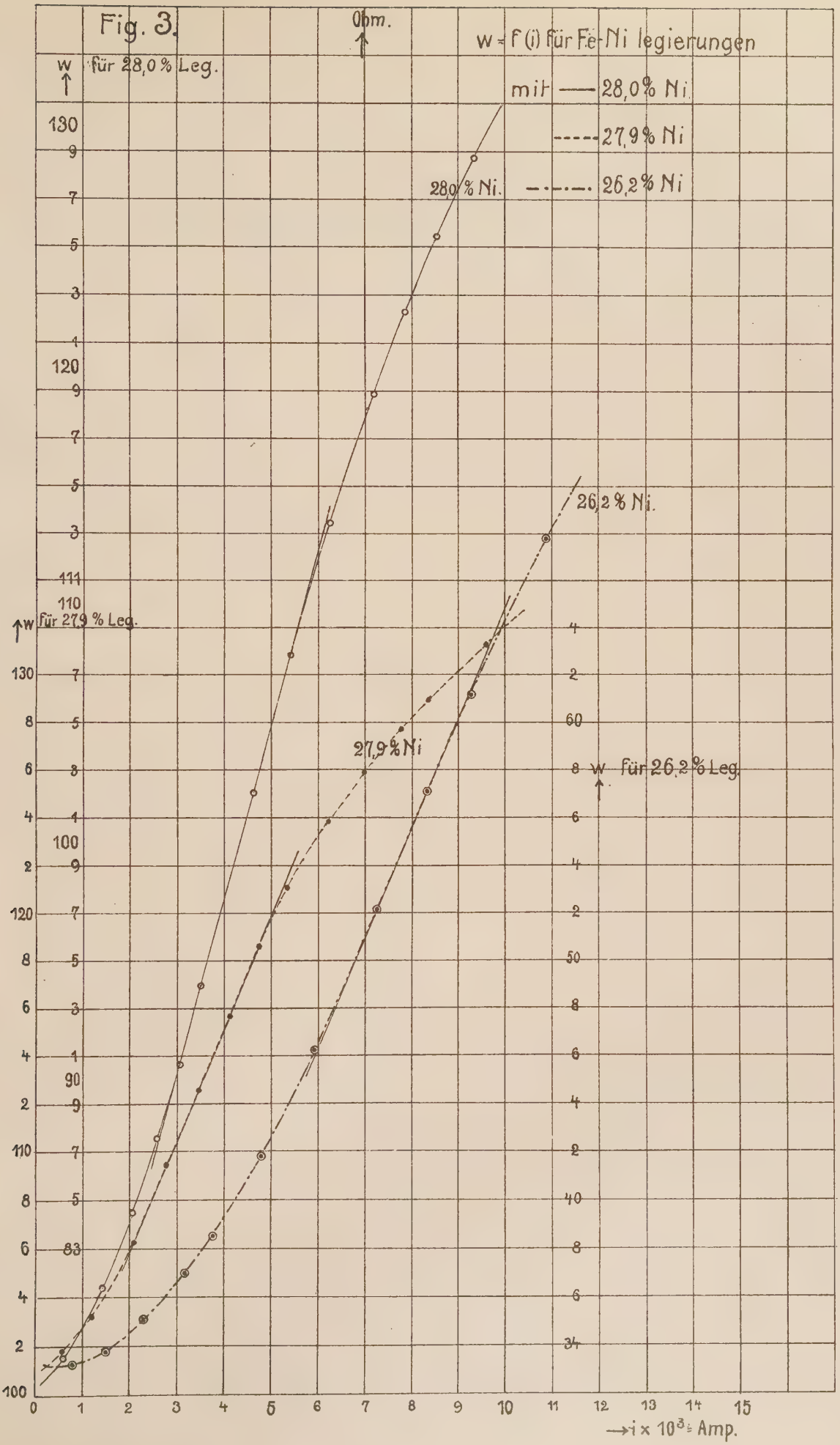
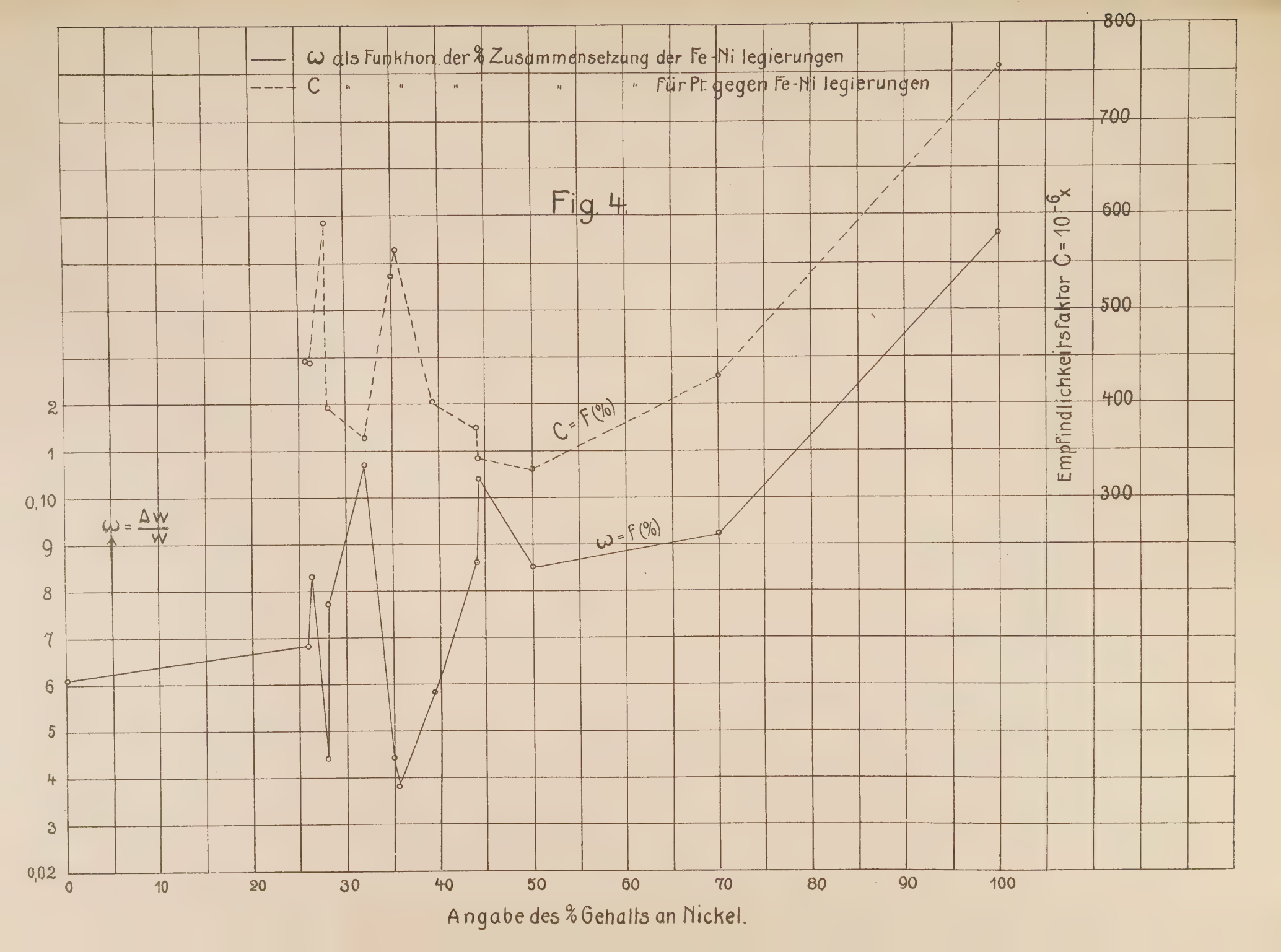
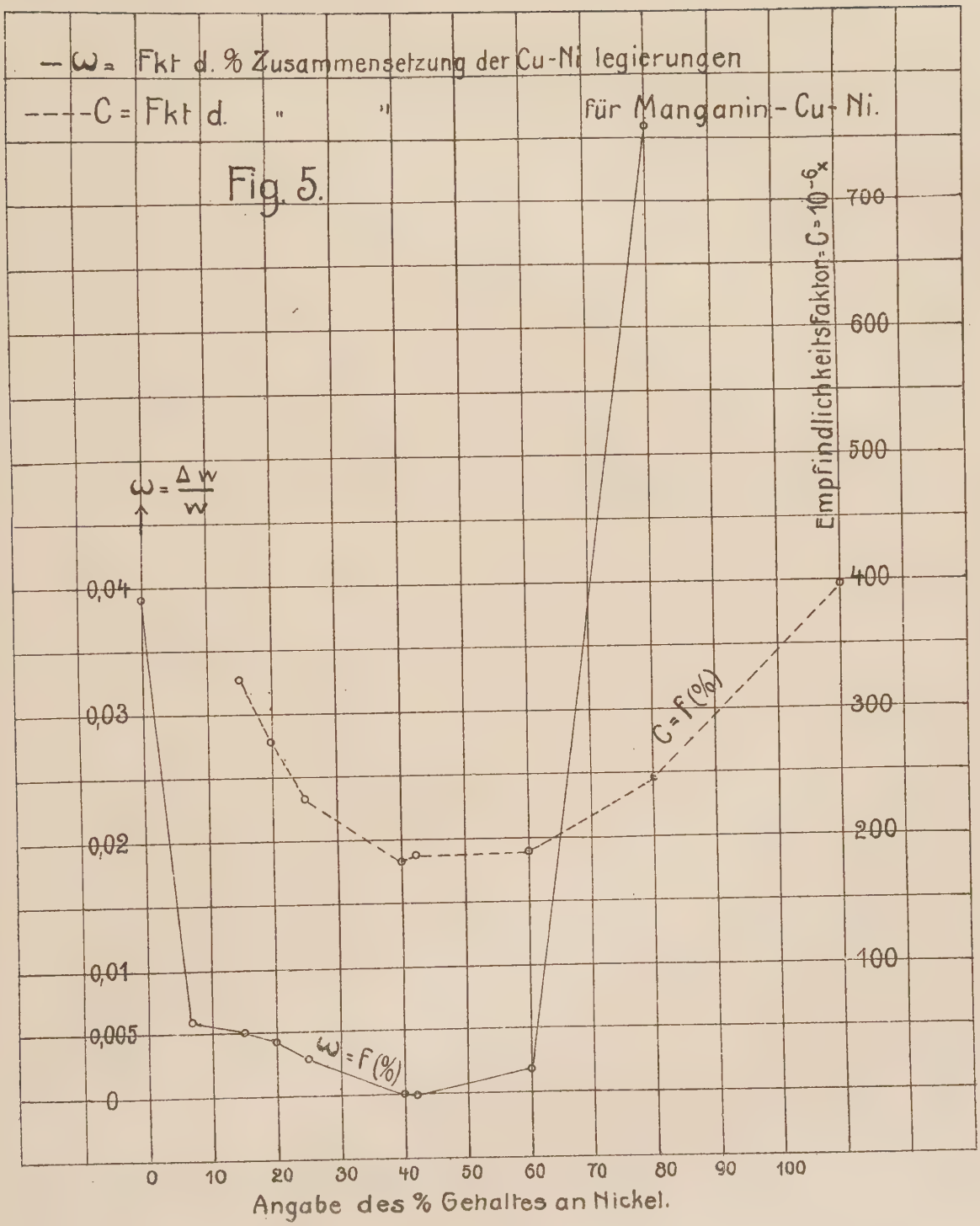
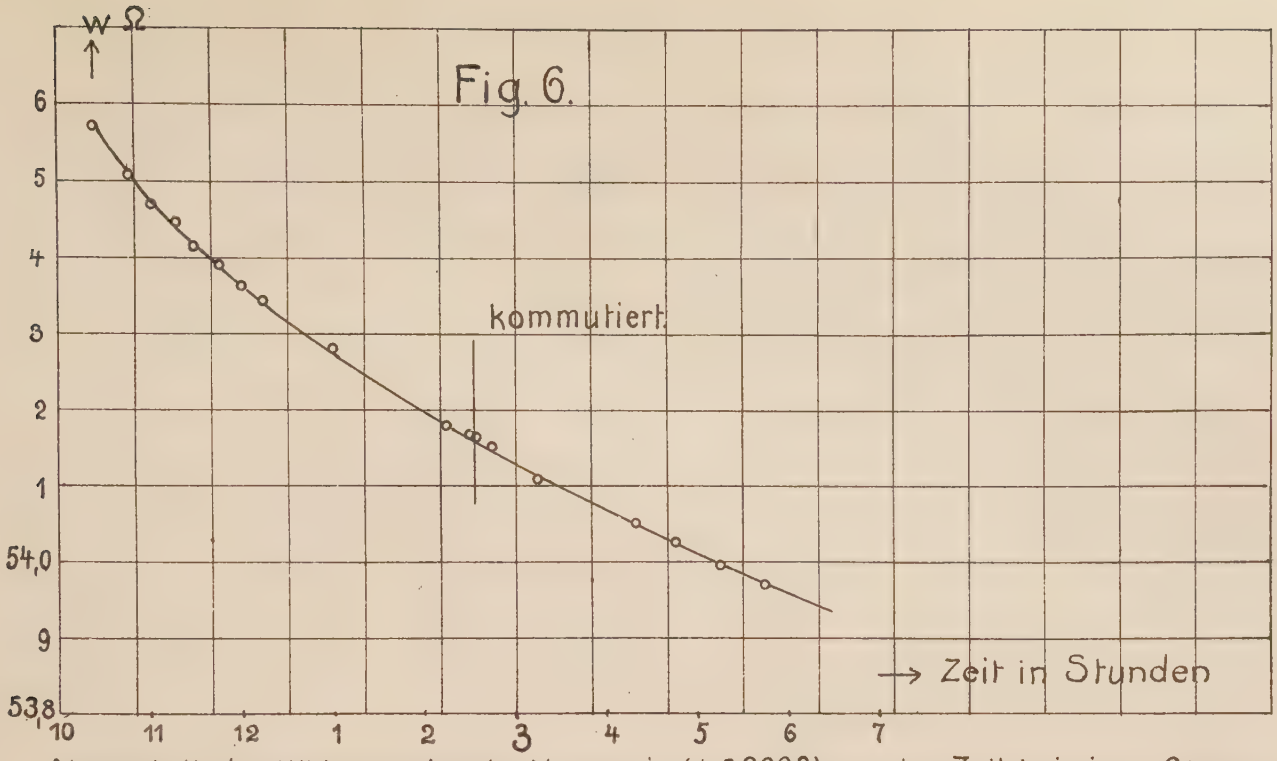


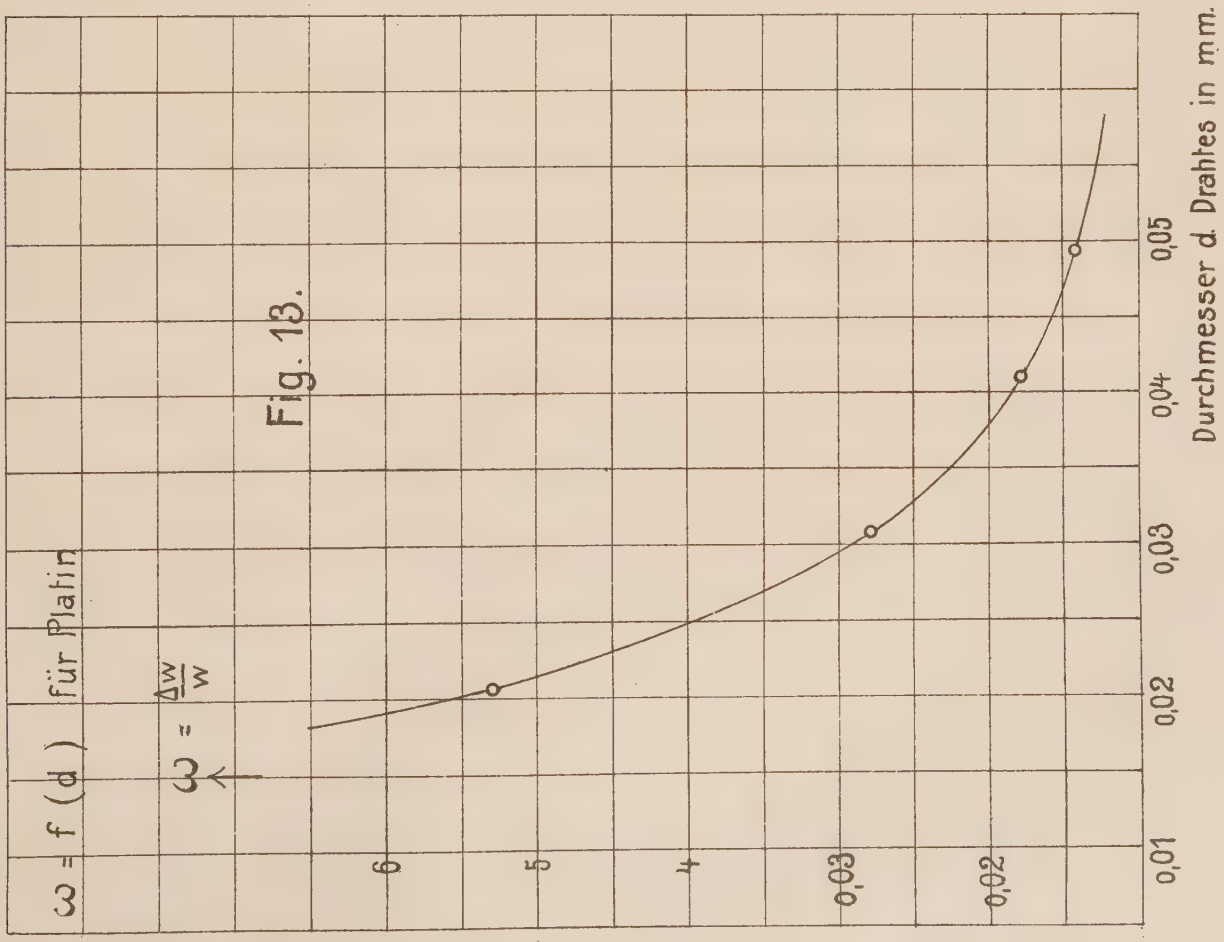
Fig. 3.
Ohm.
w = f(i) für Fe-Ni legierungen
mit —— 28,0% Ni
----- 27,9% Ni
-·-·-· 26,2% Ni
w für 28,0% Leg.
28,0% Ni.
26,2% Ni.
w für 27,9% Leg.
27,9% Ni
w für 26,2% Leg.
→ i x 10³ = Amp.

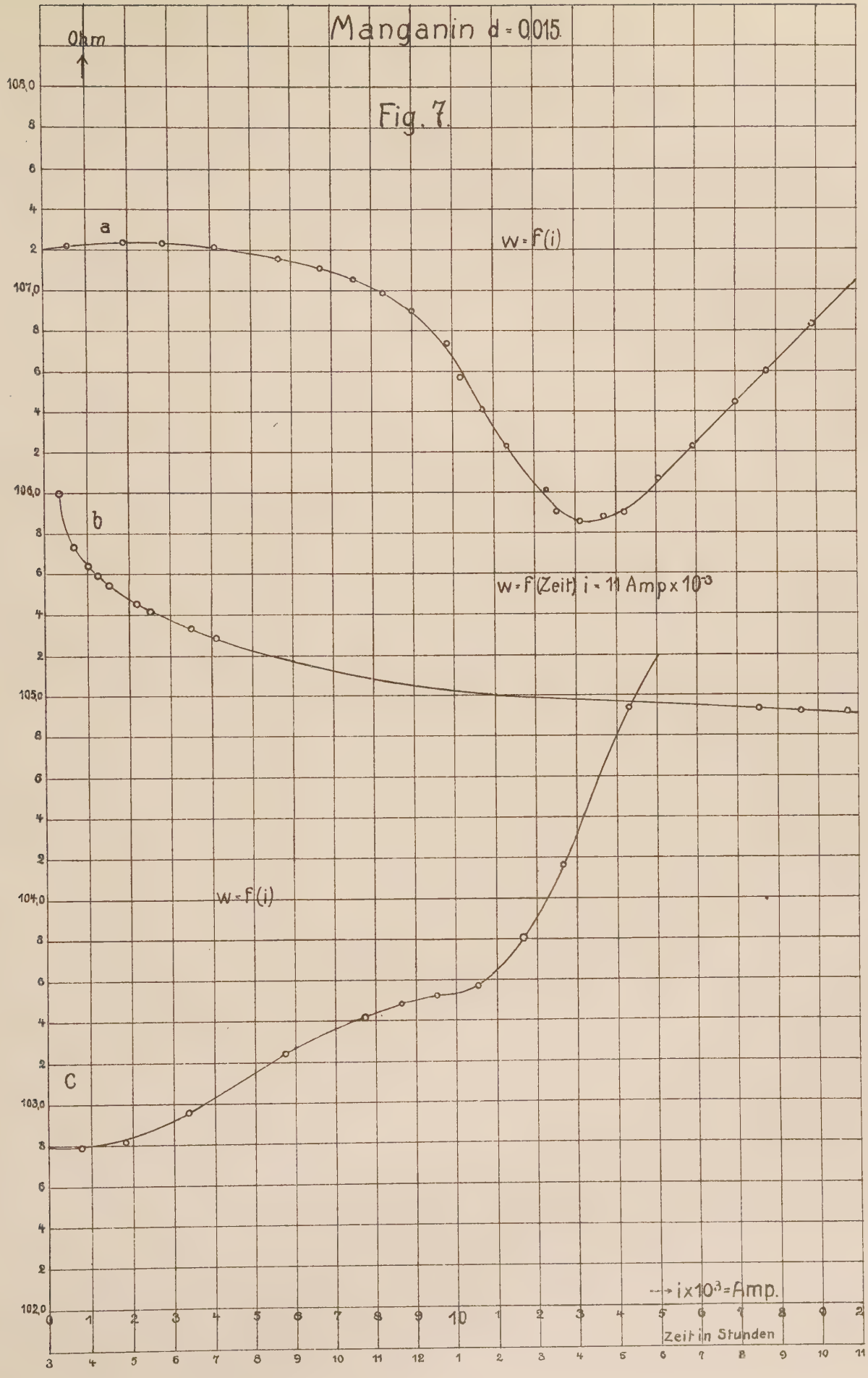

ω als Funktion der % Zusammensetzung der Fe-Ni legierungen
C " " " " " Für Pt. gegen Fe-Ni legierungen
Fig. 4.
C = F(%)
ω = F(%)
ω = Δw / w
Empfindlichkeitsfaktor C = 10⁻⁶x
800
700
600
500
400
300
2
1
0,10
9
8
7
6
5
4
3
0,02
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Angabe des % Gehalts an Nickel.

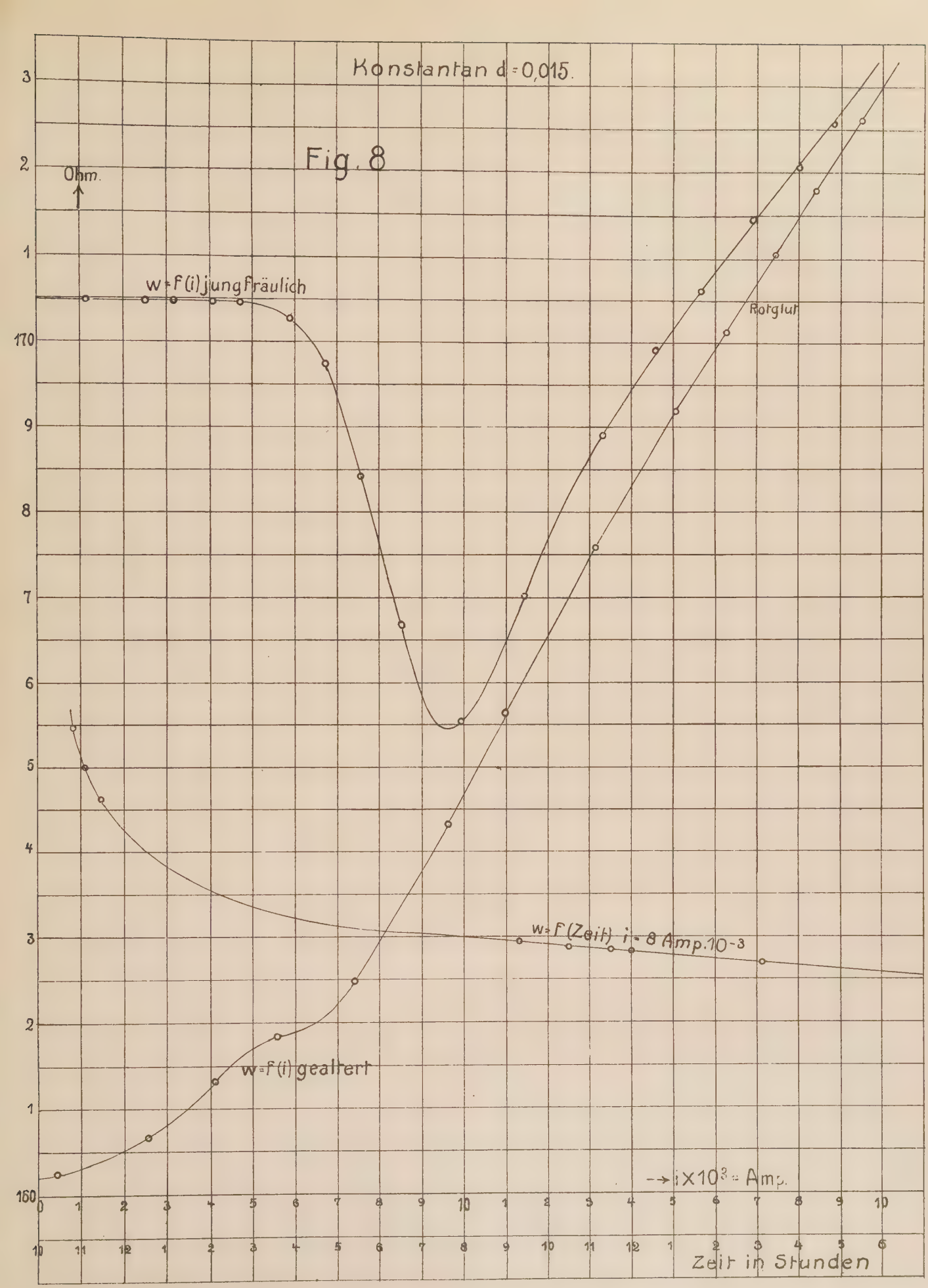

— ω = Fkt d. % Zusammensetzung der Cu-Ni legierungen
---- C = Fkt d. " " für Manganin - Cu - Ni.
Fig. 5.
ω = Δ w / w
0,04
0,03
0,02
0,01
0,005
0
C = f (%)
ω = f (%)
Empfindlichkeitsfaktor = C = 10⁻⁶ x
700
600
500
400
300
200
100
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
Angabe des % Gehaltes an Nickel.



Abhängkeit des Widerstandes des Manganin (d=0,0208) von der Zeit bei einer Strombelastung mit 9,8 Milliampere.




Manganin d = 0,015
Ohm
Fig. 7.
a
w = f(i)
b
w = f(Zeit) i = 11 Amp x 10⁻³
w = f(i)
c
→ i x 10³ = Amp.
Zeit in Stunden


Konstantan d = 0,015.
Fig. 8
Ohm.
w = f(i) jungfräulich
Rotglut
w = f(Zeit) i = 8 Amp. 10-3
w = f(i) gealtert
→ i X 10³ = Amp.
Zeit in Stunden

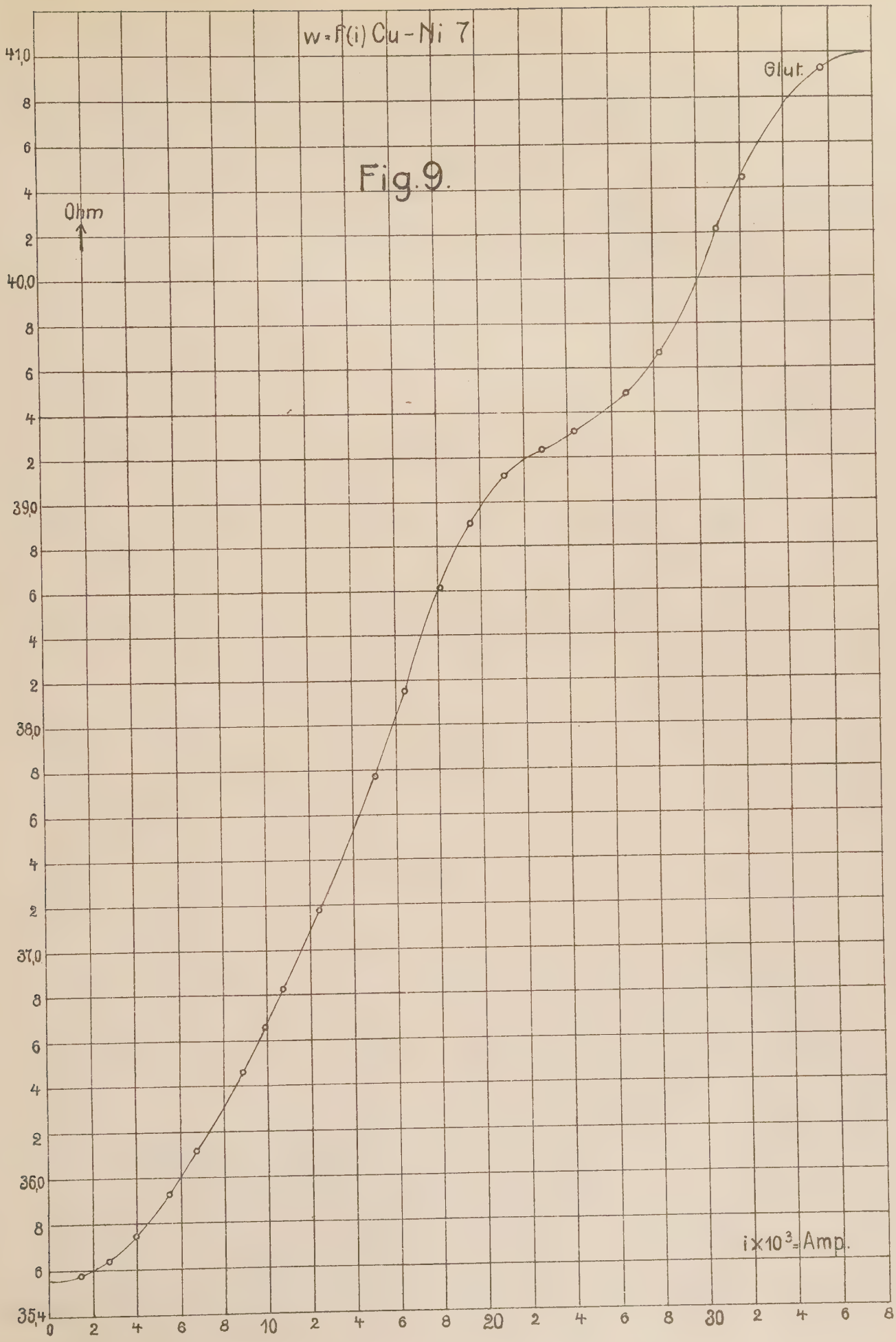
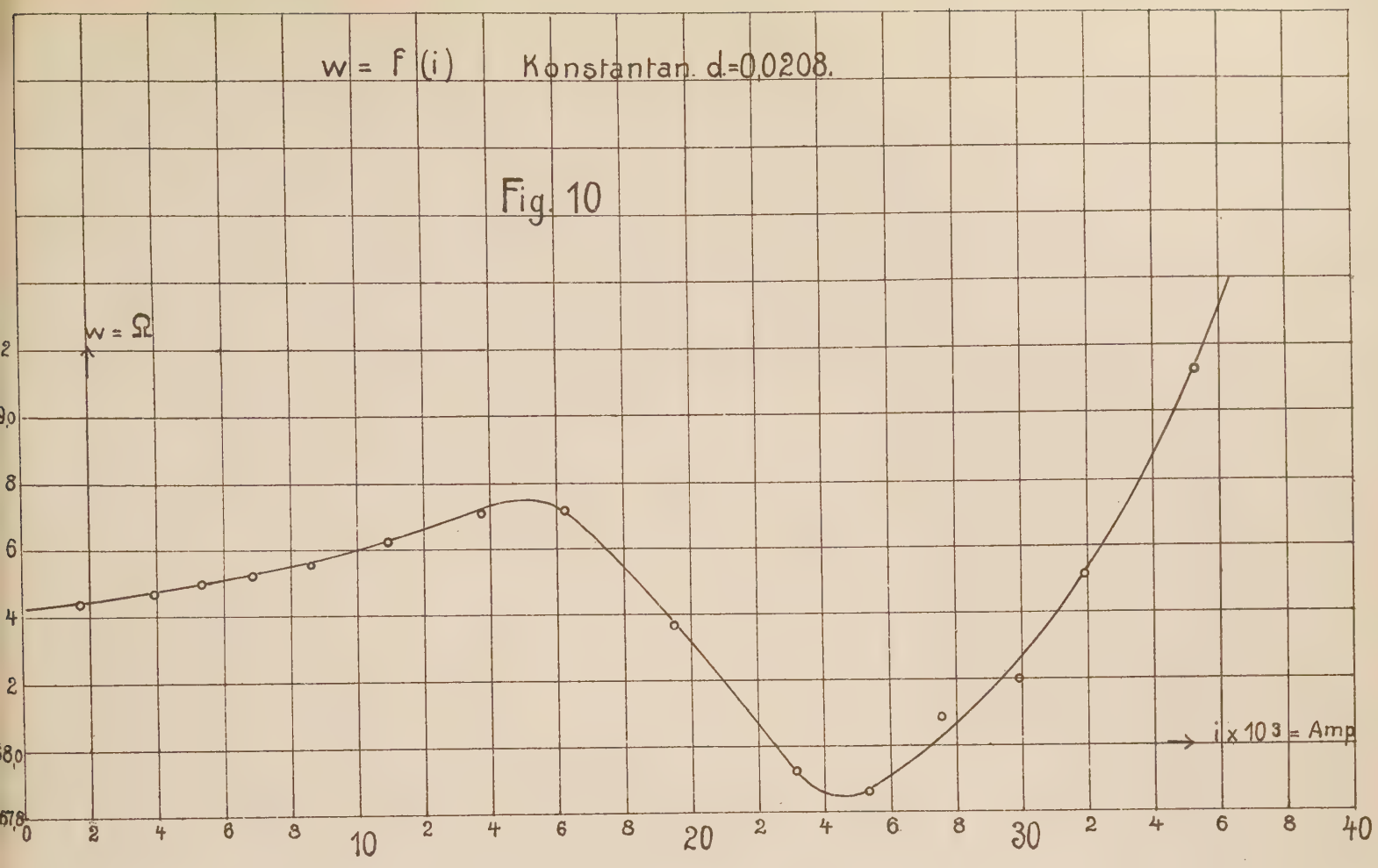

w = f(i) Cu - Ni 7
Glut.
Ohm
41,0
40,0
39,0
38,0
37,0
36,0
35,4
0 2 4 6 8 10 2 4 6 8 20 2 4 6 8 30 2 4 6 8
i x 10³ = Amp.

Fig. 9.

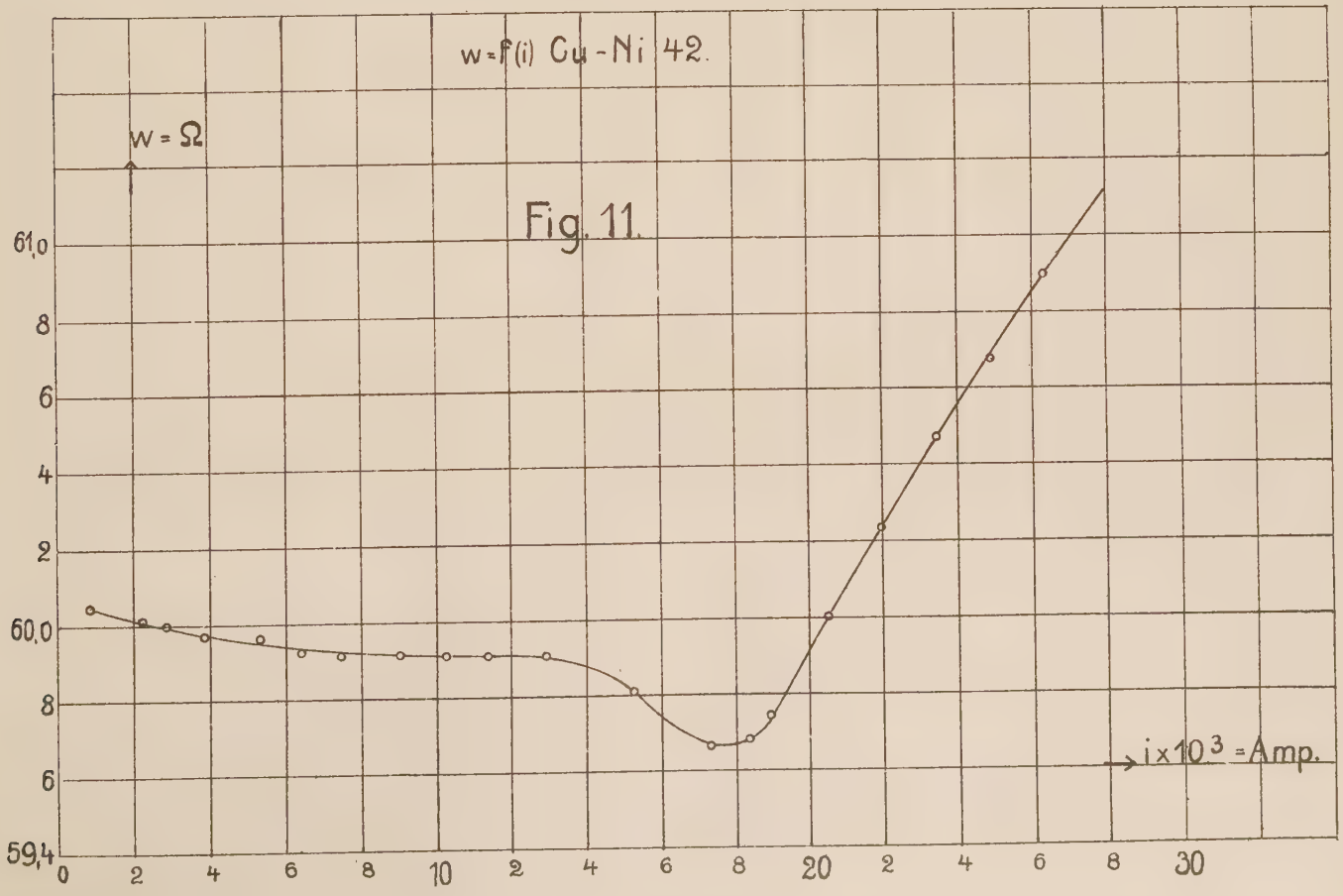
w = f (i) Konstantan. d=0,0208.

Fig. 10



w=f(i) Cu-Ni 42.

Fig. 11.



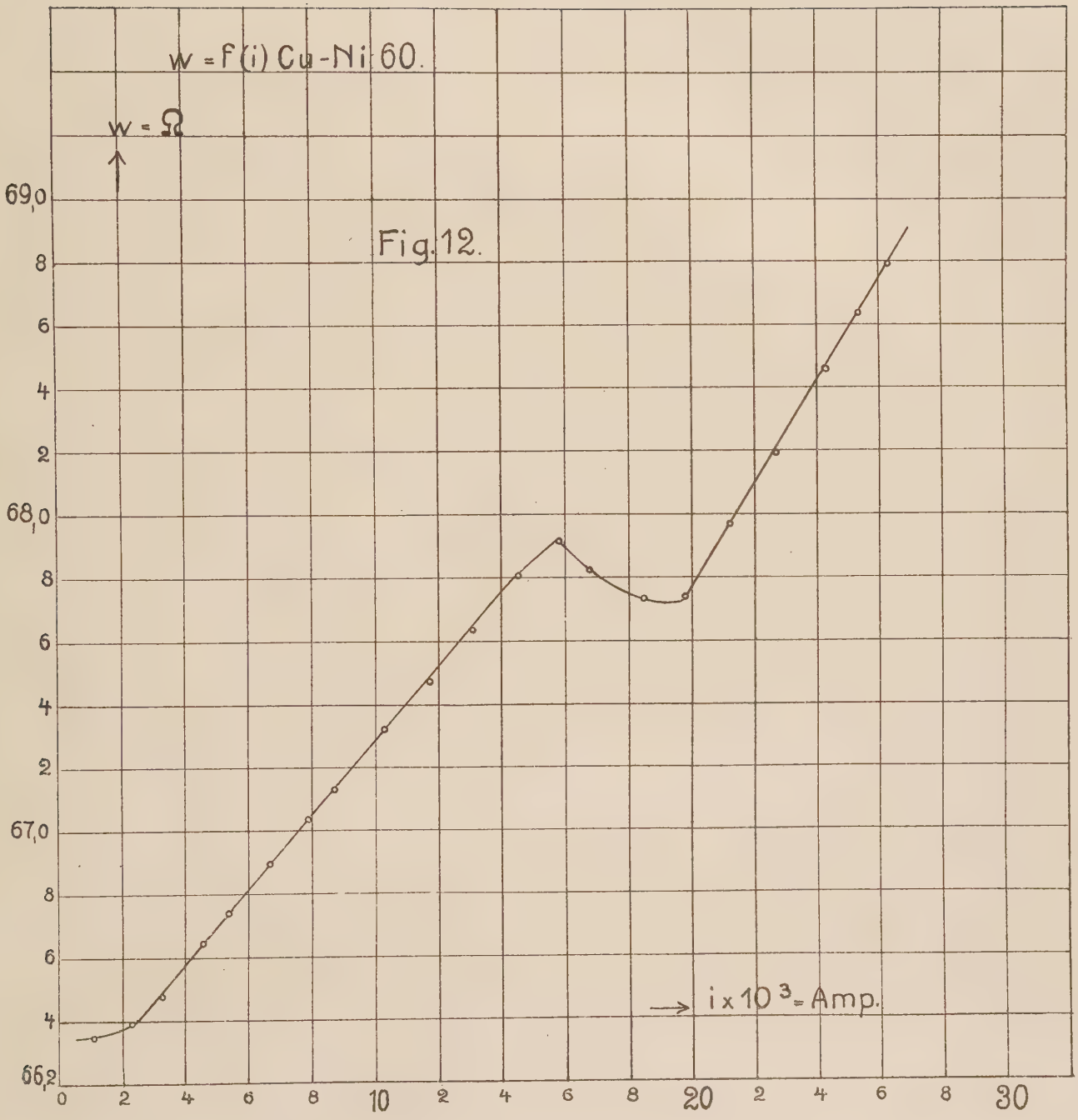
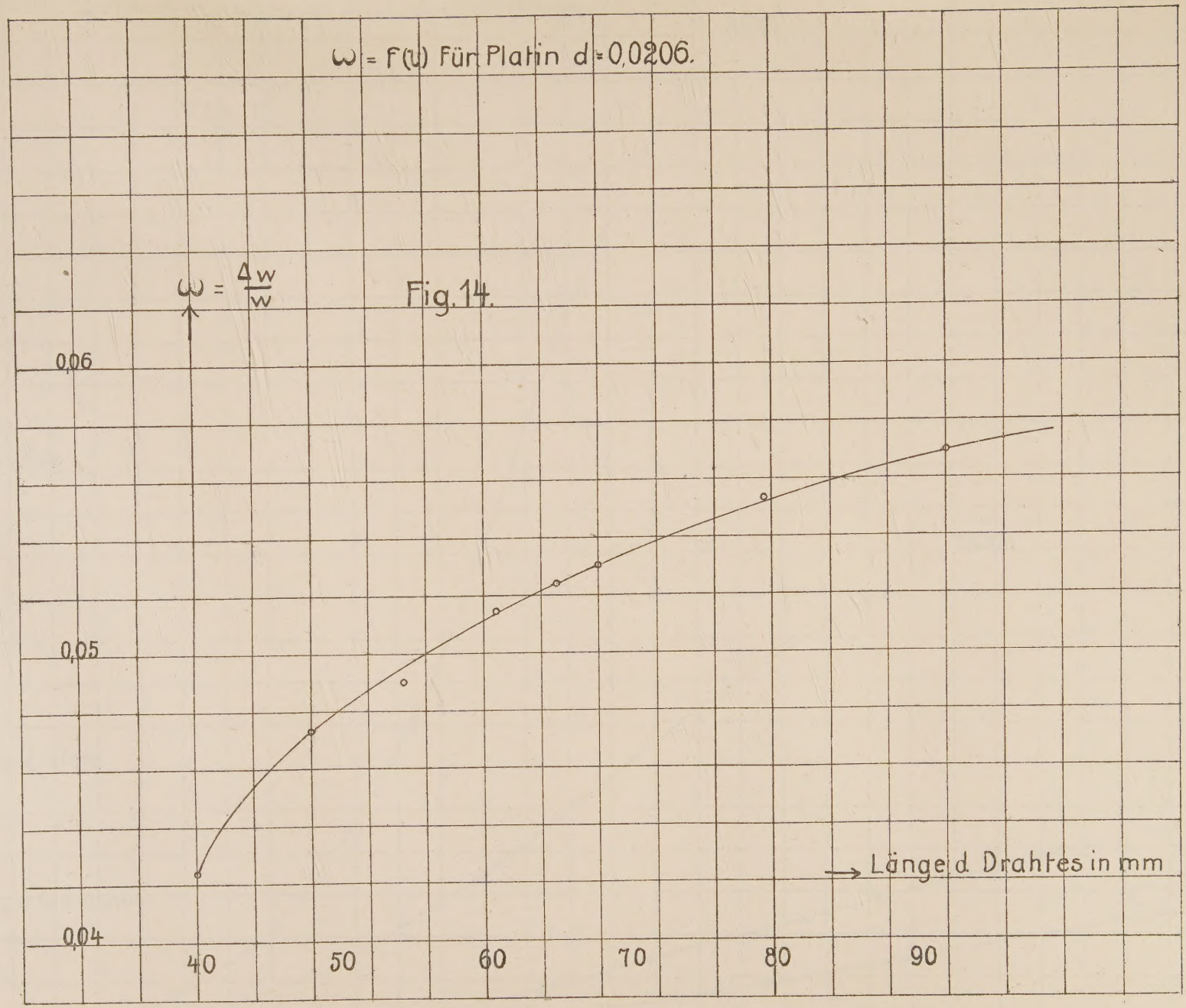
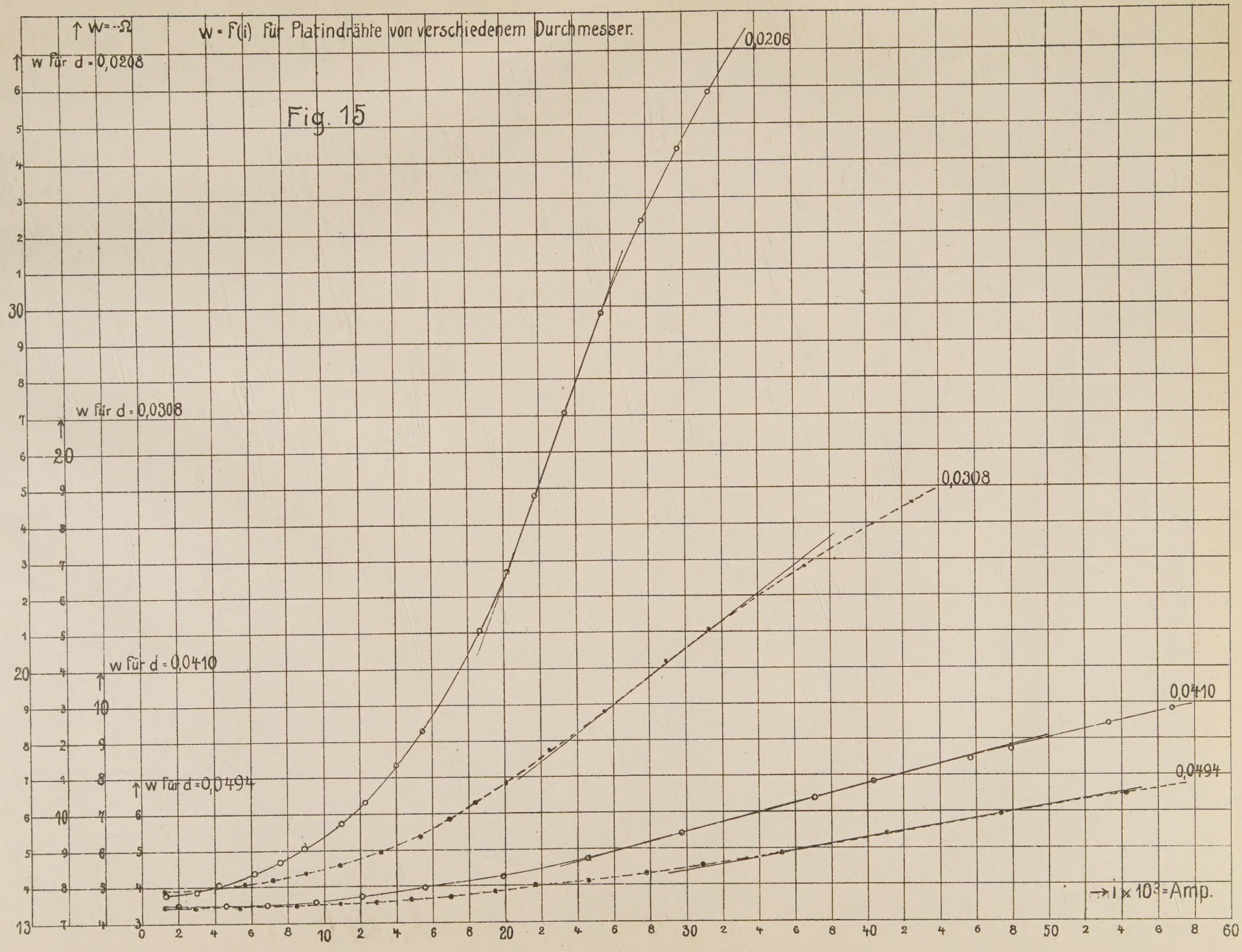

w = f(i) Cu-Ni 60.
w = Ω
69,0
8
6
4
2
68,0
8
6
4
2
67,0
8
6
4
66,2
0
2
4
6
8
10
2
4
6
8
20
2
4
6
8
30
i x 10 3 = Amp.

Fig. 12.

$\omega = F(l)$ Für Platin $d = 0{,}0206$.




↑ W=--Ω
w = F(i) für Platindrähte von verschiedenem Durchmesser.
w für d = 0,0206
Fig. 15
w für d = 0,0308
w für d = 0,0410
w für d = 0,0494
0,0206
0,0308
0,0410
0,0494
→ i × 10³ = Amp.